



Guía técnica y práctica para el diseño incremental de los caminos vecinales en función de la demanda y características topográficas y geotécnicas

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

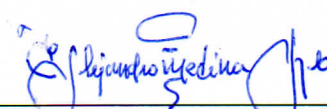
Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Eduardo Barquero Solano, Ing. Alejandro Medina Angulo, Ing. Sonia Vargas Calderón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.




Ing. Gustavo Rojas Moya
Director



Ing. Eduardo Barquero Solano.
Profesor Guía



Ing. Alejandro Medina Angulo.
Profesor Lector



Ing. Sonia Vargas Calderón.
Profesora Observadora

Abstract

The present project consists in the creation of designs related to the area of road engineering, to be used mainly by the municipal regime in the neighboring roads of its competence.

The main objective of the guide is to define a series of designs and technical recommendations in the areas of:

Drainage: Designs and calculation tool are presented for surface drainage (culverts, gutters) and sub-surface drains (sub drains, filters).

Transit: Three traffic volumes were defined to calculate the equivalent design axes.

Subgrade: A matrix and a flowchart of evaluation and characterization of the properties of several types of subgrade that can be found in the field were generated, as well as the respective recommendations to be taken into account to treat each one of them.

Pavements type designs: Thickness packages are presented for 6 different pavement structures designed by the AASHTO 1993 method, as well as the tool and calculation memories of these thicknesses.

Finally, a tool was created to control the various design premises in which real measurement values are introduced in order to compare and generate real and non-theoretical databases.

Keywords: neighborhood roads, pavements, premises, thickness design, drainage, transit, subgrade, municipalities.

Resumen

El presente proyecto consiste en la creación de diseños relacionados al área de la ingeniería vial, para que los utilice el régimen municipal en los caminos vecinales de su competencia.

El objetivo principal de la guía es definir una serie de diseños y recomendaciones de orden técnico en las áreas de:

Drenajes: Se presentan diseños y herramienta de cálculo para drenajes superficiales (alcantarillas, cunetas) y drenajes sub-superficiales (sub drenajes, filtros).

Tránsito: Se definieron tres volúmenes de tránsito para calcular los ejes equivalentes de diseño.

Subrasante: Se generó una matriz y un flujograma de evaluación y caracterización de las propiedades de varios tipos de subrasantes que se pueden encontrar en campo, así como las recomendaciones respectivas a tomar en cuenta para tratar cada una de ellas.

Diseños tipo de pavimentos: Se presentan paquetes de espesores para 6 estructuras diferentes de pavimentos diseñados mediante el método de la AASHTO 1993, así como la herramienta y memorias de cálculo de dichos espesores.

Por último, se generó una herramienta de control de las diversas premisas de diseño en la cual se introducen los valores reales de medición con el fin de comparar y generar bases de datos reales y no teóricas.

Palabras clave: caminos vecinales, pavimentos, premisas, diseño de espesores, drenajes, tránsito, subrasante, municipalidades.

Guía técnica y práctica para el diseño incremental de los caminos vecinales en función de la demanda y características topográficas y geotécnicas

Guía técnica y práctica para el diseño incremental de los caminos vecinales en función de la demanda y características topográficas y geotécnicas

DAVID CABEZAS GUEVARA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre del 2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	1
Dedicatoria	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
Marco teórico	7
Metodología	38
Resultados	50
Análisis de los resultados	92
Conclusiones	95
Recomendaciones	97
Destacables	99
Apéndices	100
Anexos	101
Referencias	102

Prefacio

El tema que se desarrolla en el presente proyecto corresponde a la creación de una guía de diseño en el campo de la ingeniería vial, principalmente para los caminos vecinales que corresponden a las municipalidades. Se presentan diseños para los diferentes aspectos que se relacionan con la infraestructura del transporte como los drenajes, volumen de tránsito, subrasante y estructura de pavimentos, así como recomendaciones y herramientas de trabajo para su uso.

La presente guía se justifica en la falta de documentación técnica y expedita para tomar decisiones rápidas en cuanto al tipo de intervenciones que se realizan en los caminos vecinales de las municipalidades. También existe incertidumbre en cuanto a la validez de las premisas de diseño utilizadas, por lo que se hace necesaria la implementación de una herramienta de control y seguimiento de dichas premisas durante la fase de operación y mantenimiento de los caminos, con el fin de comparar estos valores y determinar posibles causas de variaciones, además de generar un banco de información que permita tener datos más fidedignos para futuros diseños.

Se presenta como objetivo principal definir una guía técnica y práctica de diseños tipo para los diferentes aspectos de la ingeniería vial, mediante la parametrización de valores de importancia que establezcan diversos resultados, y que a su vez se puedan aplicar a la práctica del quehacer diario de las municipalidades. También se definen recomendaciones a utilizar, así como herramientas de trabajo y herramienta de control de premisas y variables.

aquellos que lo consideren necesario en la lucha por mejorar la eficiencia y eficacia del uso de los recursos públicos en el mejoramiento de la red vial cantonal, así como para el fortalecimiento de los gobiernos locales en este proceso de descentralización por el que apuesta el país.

También quiero agradecer a mi madre que me dio la vida y me apoyó desde mis inicios y hasta el final para culminar con todos mis estudios.

Agradecer también a la Municipalidad de Hojancha, específicamente al Alcalde Municipal Eduardo Pineda Alvarado por el apoyo que me brindó como jefe y amigo, en la facilitación de la información y el tiempo necesario para elaborar la presente guía.

Finalmente quiero agradecer al ingeniero Eduardo Barquero Solano, coordinador nacional GIZ-PRVC MOPT/BID, por su tiempo y apoyo incondicional en la asesoría técnica para la elaboración de este proyecto, y al ingeniero Alejandro Medina Angulo, profesor de la escuela de Ingeniería en Construcción también por sus aportes técnicos en la revisión del presente proyecto.

Dedicatoria

Me gustaría agradecer primeramente a Dios por darme la oportunidad de culminar mis estudios de licenciatura con este gran proyecto el cual espero pueda ser útil para todos

Resumen ejecutivo

La realización del presente proyecto se fundamentó en la necesidad de contar con información técnica clara y confiable, de manera que se puedan tomar decisiones expeditas relacionadas a la gestión vial cantonal de las municipalidades. Esta guía presenta una serie de diseños tipo para los diferentes aspectos que se relacionan con la ingeniería vial, como: drenajes, subrasantes, volúmenes de tránsito, diseños de espesores de seis tipos diferentes de estructuras de pavimentos usualmente utilizadas en la gestión vial, una herramienta de control de datos e información relacionada a las variables de diseño de pavimentos, además de las herramientas de cálculo de diseño tanto para los drenajes como para los pavimentos, de manera que si el usuario desea realizar otro diseño diferente al que se presenta en la guía pueda hacerlo y a la vez generar las memorias de cálculo.

Para llevar a cabo este proyecto se procedió primero a categorizar la guía por objetivos específicos, donde el primero es el que se relaciona con los elementos de los sistemas de drenaje en carreteras, en la guía se establecen diseños y recomendaciones para dos tipos de drenajes: 1. Superficial, en el cual se detallan diseños de alcantarillas y cunetas y 2. Subsuperficial, en el cual se detallan aspectos relacionados con subdrenajes y filtros. Para obtener estos detalles se procedió a realizar investigación de diversas fuentes bibliográficas y el análisis de métodos de diseño. Se obtuvo que para el diseño de drenajes se requiere primeramente del estudio hidrológico de la vía para lo cual se utilizó el método racional que considera diversos factores hidrológicos como: el área tributaria de la cuenca, el coeficiente de escorrentía ponderado de la cuenca, la pendiente de la cuenca, periodo de retorno, tiempo de concentración, intensidad de lluvia de la zona según los mapas de isoyetas del Instituto Meteorológico Nacional.

Posteriormente se propusieron una serie de diseños geométricos de cunetas y alcantarillas

basados en las medidas de diámetros comerciales de alcantarillas de concreto y diseños de cunetas según el manual de diseños del MOPT.

Para el caso de las cunetas se diseñaron para dos tipos, cunetas revestidas de concreto y cunetas de tierra, luego se parametrizaron los diseños basándose en diferentes pendientes de la vía. Se utilizó como criterio de idoneidad la longitud máxima admisible para dicha cuneta dependiendo de su capacidad, caudal y pendiente, para las cunetas con pendientes mínimas de 0,5 % se utilizó como criterio que restringe su diseño su capacidad hidráulica mientras que para las de mayor pendiente se utilizó como criterio la velocidad erosiva su superficie.

En el caso de las alcantarillas se propusieron diversos diseños basados en los diámetros comerciales que se ofrecen en el mercado para las alcantarillas de circulares y para las de cuadro se utilizaron medidas en múltiplos de “pies” correspondiente a la medida de longitud del sistema inglés, esto debido a que en la práctica dichas medidas resultan más eficientes para su construcción con el empleo de formaleta metálica prefabricada, tanto para el encofrado de los muros como el del fondo de las losas superiores, esto permite optimizar recursos y evitar el desperdicio de madera para formaleta, además de que dichas medidas calzan a la perfección con la de los elementos de formaleta.

Para todos estos diseños se procedió a determinar su capacidad hidráulica y por ende el caudal hidráulico mediante la fórmula de *Manning* para canales con flujo permanente y uniforme. Para estos casos y para cada uno de los detalles se procedió a determinar el caudal hidráulico en función de las pendientes y de las propiedades geométricas de los elementos, estas son: Tirante “y”, área hidráulica, radio hidráulico, perímetro mojado, relación de talud “z” y coeficiente de gasto adherido “c/d”, la fórmula de *Manning* requiere además de una constante “n” llamada constante de *Manning* que se relaciona con la

rugosidad del material del conducto. Para este proyecto se utilizó una “n” para concreto que corresponde aproximadamente a 0,015. Con estos valores se obtienen los datos de caudales hidráulicos y velocidades. Posteriormente para las cunetas se procede a comparar dichas velocidades con las velocidades erosivas y de resultar mayor la velocidad del flujo con respecto a la erosiva se procede a condicionar la longitud de la cuneta a un caudal máximo que genere una velocidad máxima igual o menor a la erosiva, una vez que se obtiene la velocidad máxima se recomienda hacerla valer mediante la colocación de algún paso de alcantarilla o la construcción de un disipador de energía o aliviadero.

En el caso de las alcantarillas la herramienta de cálculo condiciona el diseño al cumplir con la siguiente inequación:

$$Q_{hidráulico} \geq 1,05 * Q_{hidrológico}$$

Esto quiere decir que la capacidad hidráulica calculada del elemento que se seleccionó debe de ser mayor o igual a uno punto cero cinco el caudal hidrológico correspondiente a la cuenca que le drena, adicionalmente la herramienta de cálculo permite seleccionar más de una fila de alcantarilla por paso y permite utilizar máximo tres filas por línea, tanto para las alcantarillas circulares como para las de cuadro, permitiendo así revisar la idoneidad de la utilización de cierto diseño seleccionado y compararlo con otros al tomar en cuenta aspectos de costos y de criterio técnico del profesional responsable.

En el caso de los drenajes subsuperficiales se definieron con base en investigación y consultas al profesor asesor Eduardo Barquero Solano. A su vez estos detalles se complementan con la matriz de clasificación de subrasantes propuesta en esta guía y para lo cual sirven como recomendación en el caso de que al realizar la exploración geotécnica respectiva se determine que se requiere de algún elemento de subdrenaje, por lo que para cada uno de los detalles de subdrenajes y filtros se asocian a una condición encontrada y se emiten las recomendaciones del caso.

Al continuar con los objetivos específicos de la guía para la sección de tránsito, se procedió a clasificarlo en tres categorías de tres volúmenes diferentes. La primera para bajos volúmenes de tránsito con pocos vehículos

pesados la cual puede oscilar aproximadamente los 500 000 ejes equivalentes de 8,2 toneladas por carril de diseño para el periodo de diseño. El segundo para vehículos pesados el cual según AASHTO corresponde a un tránsito de 500 vehículos diarios con un 10 % de vehículos pesados y el cual se aproxima a 1 000 000 de ejes equivalentes de 8,2 toneladas por carril de diseño para el periodo de diseño, este tránsito es muy típico en los caminos vecinales rurales que sirven para conectar zonas productivas y que sirven para el transporte de productos agrícolas y ganaderos. La tercer clasificación se definió para un alto volumen de tránsito que corresponde a aproximadamente 5 000 000 de ejes equivalentes por carril de diseño. Este valor se determinó al prever un incremento en el flujo vehicular debido al tránsito atraído que se pueda generar producto de la mejora en el camino, ya que una vez que se rehabilita o se mejora una vía la misma tiende a atraer tránsitos que antes no pasaban y que en algunas ocasiones duplican y hasta triplican el tránsito existente hasta el momento.

Para el objetivo específico correspondiente a la definición de las propiedades de los diversos materiales, para efectos de la presente guía se trabajó para la parte de diseño de pavimentos con los valores de los CBR establecidos por el código CR-2010 y los cuales corresponden a 30 % para subbases granulares y 80 % para bases granulares, sin embargo la herramienta de cálculo permite utilizar los valores reales de las propiedades de los materiales con que se cuente, así como la posibilidad de utilizar bases estabilizadas para aumentar la capacidad estructural del pavimento cuando los materiales existentes no cuenten con la suficiente capacidad.

En cuanto al objetivo específico que se relaciona con la subrasante, se establecieron cuatro categorías de subrasantes: Tipo A, tipo B, tipo C y tipo D, las cuales se clasificaron según parámetros geotécnicos, como el tipo de suelo según la clasificación AASHTO, familias de suelos según su ubicación en la carta de plasticidad de Casa Grande, valor de CBR, límites de Atterberg, si cuenta o no con nivel freático, si cuenta o no con flujo interno. Una vez que se realizó la categorización se creó una segunda matriz en la que se empiezan a determinar según las diferentes condiciones encontradas las acciones a realizar para tratar la subrasante, como se mencionó anteriormente en

la parte de subdrenajes, se establecieron diferentes detalles que se complementan con esta matriz. También se incorporaron los aspectos de “condición futura esperada”, que es la condición que se lograría si se toman en cuenta las recomendaciones a la subrasante.

En esta sección es de vital importancia su entendimiento e interpretación ya que es en esta fase, la de evaluación de la subrasante y estudios preliminares, en donde se deben de tomar las decisiones que afectarán todo el proyecto y en donde se debe tener claro cuáles serán las obras que se requieren y su costo para ser incorporadas dentro del plan de trabajo y el presupuesto que se debe asignar a la obra.

Para el objetivo específico que se relaciona con el diseño de pavimentos, se procedió, una vez definidas todas las variables anteriores, a diseñar el paquete de espesores para seis estructuras deferentes de pavimentos por el método de la AASHTO 1993. Las estructuras que se utilizaron fueron las siguientes: 1. Pavimento flexible con carpeta asfáltica como capa de rodadura, 2. Pavimento flexible con tratamiento superficial como capa de rodadura, 3. Pavimento semirrígido con capeta asfáltica como capa de rodadura, 4. Pavimento semirrígido con tratamiento superficial como capa de rodadura, 5. Pavimento articulado con adoquines de concreto como capa de rodadura, y 6. Pavimento rígido con losa de concreto como capa de rodadura. Dichos diseños se realizaron para tres rangos de CBR, la primera para un $\text{CBR} \leq 4 \%$, el cual se determinó por recomendación del profesor asesor Eduardo Barquero, este rango define una subrasante como débil, la otra para un valor de CBR entre 5% y 9% , los cuales corresponden valores intermedios y que son valores que se encuentran comúnmente en los suelos y el tercer rango para un $\text{CBR} \geq 10 \%$ que sería la condición obtenida que se espera después de que una subrasante débil se interviene y se mejora.

Con estos valores de CBR y con los volúmenes de tránsito establecidos previamente se proceden a realizar los diseños de los paquetes de espesores mediante el método de la AASHTO 1993 para las seis estructuras de pavimentos propuestos. En total se generaron un total de 54 paquetes de diseños con sus respectivos detalles de planos. Cabe destacar que al tratarse el método de la AASHTO 1993 como un método empírico, dichos espesores

corresponden a la propuesta inicial del diseño final del pavimento, ya que es recomendable verificar dichos espesores mediante un análisis de fatiga y deformación permanente (ahuellamiento). Para esto se deben utilizar diversos tipos de *softwares* libres disponibles en el mercado como por ejemplo el PITRA PAVE elaborado por LANAMME, el cual utiliza para el análisis la teoría de multicapa elástica o elementos finitos y luego se debe proceder a determinar los umbrales de falla según la publicación LM-PI-GM-INF-22-14 de LANAMME correspondiente al diseño de pavimentos, incorporando criterios mecánico-empíricos. Para el caso de la elaboración del presente proyecto este análisis no se realizará.

Para el último objetivo específico se elaboró una herramienta para medir y controlar las premisas de diseño establecidas originalmente en los diseños. Esta herramienta genera una hoja de datos que se puede complementar con los expedientes de caminos y que a su vez sirve de información para futuros diseños o intervenciones que se realicen en la vía, esta herramienta incluye la incorporación de datos de interés como: tránsito promedio diario, lo cual a su vez genera una tasa de crecimiento vehicular real con la distribución real de los tipos de vehículos, datos de CBR para las diferentes estaciones del año (con estos valores se podría obtener en CBR efectivo promedio “UF” para la unidad homogénea de diseño) que se obtienen a partir del ensayo “DCP”, estado del camino, tipo de superficie, geometría de la vía, espesores actuales y estado del sistema de drenaje que a su vez define la necesidad de incorporar alcantarillas y cunetas.

Con toda esta información se pudo generar una guía para la gestión vial cantonal bastante completa y útil para las municipalidades y que se espera fortalezca las decisiones técnicas que se puedan tomar en los diversos mejoramientos y/o rehabilitaciones.

La conclusión más importante es que se pudo determinar una serie de diseños y recomendaciones técnicas a aplicar en la fase de diseño y planeamiento de las obras de conservación y desarrollo vial y que permiten un ahorro en tiempo en la toma de decisiones y a la vez brinda un panorama más claro de la magnitud del proyecto a desarrollar.

Introducción

El proyecto de graduación para obtener el grado de licenciatura en ingeniería en construcción se realizó para beneficio del régimen municipal, específicamente para los departamentos de obras civiles y unidades técnicas de gestión vial, en el área estratégica de infraestructura y transporte. Estas dependencias son las que se encargan de planificar, ejecutar, controlar y evaluar los proyectos de conservación de desarrollo vial de la red vial cantonal del país (esta red está conformada por calles urbanas, caminos vecinales, caminos no clasificados en uso y caminos no clasificados en desuso). El presente proyecto se enfoca principalmente en los caminos vecinales.

El proyecto se llama: *“Guía técnica y práctica para el diseño incremental de los caminos vecinales en función de la demanda y características topográficas y geotécnicas”*, la cual consiste en la creación de una serie de diseños tipo y recomendaciones técnicas para las diversas áreas de aplicación de la ingeniería vial (drenajes, tránsito, subrasante, estructuras de pavimentos y control de premisas de diseño). La importancia de este proyecto para las municipalidades en el desarrollo de la infraestructura del transporte radica en contar con una guía de diseños y recomendaciones detallados con sus herramientas de trabajo en Excel y memorias de cálculo como respaldo, para tomar decisiones rápidas a la hora de planificar y presupuestar las obras viales, de manera que exista un ahorro significativo en tiempo, ya que se pueden seleccionar los diseños de manera casi inmediata. Como objetivos general y específicos del proyecto se plantearon los siguientes:

Objetivo general

Definir una guía técnica y práctica para el diseño incremental de los caminos vecinales en función

de la demanda y características topográficas, geotécnicas e hidráulicas; mediante la parametrización de valores de importancia que establezcan diversos resultados.

Objetivos específicos

- 1) Recomendar los principales elementos para el mejoramiento de los sistemas de drenaje para caminos vecinales, dependiendo de diversas condiciones encontradas.
- 2) Determinar los correspondientes volúmenes de tránsito para las diferentes alternativas de diseño de pavimentos, con base en criterios técnicos y fuentes de información existente.
- 3) Definir las propiedades de los materiales de bases y subbases granulares, bases estabilizadas y superficies de rodamiento, para efectos de diseño de pavimentos.
- 4) Establecer un flujograma y matrices de evaluación y caracterización de las propiedades de la subrasante con el fin de definir diversos parámetros de diseño y recomendaciones, para definir las obras a realizar previas a la construcción de la estructura de pavimento.
- 5) Diseñar los diversos detalles tipo para cada una de las condiciones que eventualmente se puedan presentar a la hora de realizar un mejoramiento de la estructura de pavimento de un camino vecinal.
- 6) Crear la herramienta de control y seguimiento de variables para que las Municipalidades puedan ir generando bases de datos.

La justificación para crear la presente guía es que actualmente las municipalidades cuentan con herramientas incompletas para la gestión vial, como por ejemplo se pueden mencionar varias publicaciones que realizó el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), en donde se cuentan con guías para el diseño de caminos de bajo volumen de tránsito, en la que se presentan una serie de diseños de espesores en función de varios volúmenes de tránsito y CBR, centrándose solamente en el diseño estructural de los pavimentos, así como también se cuenta con manuales más complejos como el Manual Colombiano de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito, el cual contiene diversa teoría y diseños, pero se centra específicamente en pavimentos asfálticos. La propuesta de la presente guía presenta una variedad más amplia de elementos de la ingeniería vial, no solo se centra en el diseño de espesores sino que contempla elementos para los demás aspectos que se relacionan con la vialidad, como los drenajes, también recomendaciones para el tratamiento y selección de la subrasante, volúmenes de tránsito típicos para estos tipos de vías, diseños de espesores de diversos tipos de estructuras de pavimentos y una herramienta de control de premisas de diseño, por lo que se espera que pueda ser útil y competente en la gestión vial.

Para elaborar de la presente guía, se tuvo que realizar una investigación en tres ramas diferentes de la ingeniería civil: la geotecnia, la hidráulica y la vialidad.

La geotecnia es muy relevante en el área de la vialidad ya que es sobre el suelo donde se construye una carretera, conocer muy bien desde el punto de vista geotécnico la subrasante es vital para el éxito de cualquier proyecto, pues a partir de esa caracterización es que se deben tomar las decisiones adecuadas para su buen comportamiento y por ende una buena construcción de la estructura de pavimento. Para este aspecto se tomaron en cuenta conceptos como la granulometría, clasificación de suelos en la carta de plasticidad y las categorías según la AASHTO, los límites de Atterberg, presencia de ascensión capilar y flujo subsuperficial, así como propiedades mecánicas como la capacidad de soporte o CBR.

Por otro lado, el análisis hidráulico e hidrológico se centró más en la parte de drenajes,

en donde se utilizó el método racional para la determinación de los caudales hidrológicos y la fórmula de *Manning* para calcular la capacidad hidráulica de los elementos bajo la condición de flujo uniforme. En este apartado se utilizaron las diversas propiedades geométricas y fórmulas para determinar los caudales. Esta información se pudo obtener gracias al manual de hidráulica de canales, cuyo autor es Máximo Villón Béjar, director de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Para el área de la vialidad, se procedió a utilizar el método de la AASHTO 1993 para el cálculo de los espesores de las diversas estructuras de pavimentos, utilizando los parámetros definidos en la presente guía, sobre tránsito, CBR y los valores de confiabilidad y propiedades de los materiales.

Gracias al acceso a toda la información de la bibliografía consultada y al considerar las recomendaciones hechas por el profesor asesor, el ingeniero Eduardo Barquero Solano, se logró crear el presente proyecto con los respectivos diseños, recomendaciones, herramientas de trabajo y memorias de cálculo que obedecen al cumplimiento de los objetivos específicos para cada área de trabajo. Al unir toda la investigación se obtuvo la guía técnica que permite satisfacer las principales necesidades en el quehacer diario de la gestión vial de las municipalidades.

Por último, por recomendación del profesor lector el ingeniero Alejandro Medina, se añadió una sección adicional a las conclusiones y recomendaciones del proyecto, la cual consistió en el apartado de “destacables”, en la que se mencionan una serie de situaciones de interés y curiosidades que se obtuvieron a raíz del desarrollo del presente proyecto, y que pueden ser de gran utilidad a tomar en cuenta para aquellos estudiantes y profesionales que así lo consideren necesario.

Marco teórico

Drenajes

En una carretera, el sistema de drenaje es el “conjunto de obras que permiten un manejo adecuado de los fluidos, para la cual es indispensable considerar los procesos de captación, conducción, y evacuación de los mismos”¹.

El exceso de agua u otros fluidos en los suelos o en la estructura de una carretera, afecta sus propiedades geo mecánicas, los mecanismos de transferencia de carga, presiones de poros, subpresiones de flujos, presiones hidrostáticas e incrementa la susceptibilidad a los cambios volumétricos. Por tal motivo y aun cuando el agua es un elemento fundamental para la vida, es una de las causas más relevantes del deterioro prematuro de la infraestructura vial.

A continuación, los tipos de sistemas de drenaje.

Drenaje superficial

Corresponde al “conjunto de obras destinadas a la recogida de las aguas pluviales o de deshielo, su canalización y evacuación a los cauces naturales, sistemas de alcantarillado o a la capa freática del terreno”².

Son obras que actúan directamente sobre la carretera y las obras para el control de erosión de taludes que resultan muy importantes en la estabilidad de la vía.

Las obras de drenaje superficial que trabajan directamente sobre la carretera se consideran como longitudinales o transversales, según la posición que estas guarden con respecto al eje de la vía.

¹ Fuente: “Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América”

² Fuente: “Manual de Carreteras del Paraguay”

Entre las obras de drenaje superficial más usuales se pueden considerar las siguientes:

- Bombeo.
- Bordillos.
- Lavaderos.
- Cunetas.
- Vegetación.
- Zanjias de coronación o contracunetas.
- Alcantarillas.

La siguiente figura ilustra los detalles de drenajes superficiales:

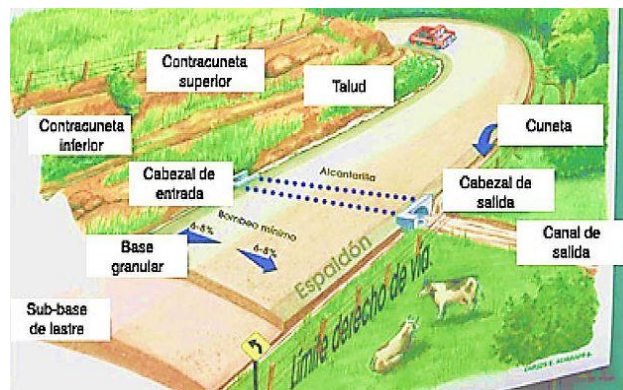


Figura 1. Principales elementos del sistema de drenaje superficial (Fuente: Proyecto MOPT/GTZ, Cooperación Alemana, Costa Rica).

Para el caso particular del presente proyecto, se presentan diseños de drenajes superficiales específicamente para alcantarillas y cunetas, sin embargo es importante recalcar los detalles complementarios para que estos sistemas funcionen eficientemente.

Cuneta

Las cunetas son “estructuras de drenaje que captan las aguas de escorrentía superficial proveniente de la plataforma de la vía y de los

taludes de corte, conduciéndolas longitudinalmente hasta asegurar su adecuada disposición”³.

Las que se construyen en zonas en terraplén protegen también los bordes de la berma y los taludes del terraplén de la erosión que causa el agua lluvia, además de servir en muchas ocasiones para continuar las cunetas de corte hasta una corriente natural, en la cual desfogar.

En zonas de corte, los puntos de disposición son cajas colectoras de alcantarillas y salidas laterales al terreno natural en un cambio de corte a terraplén. En terraplén, las aguas se disponen al terreno natural mediante bajantes o aliviaderos y en las cunetas de un separador central las aguas también son conducidas a la caja colectora de una alcantarilla.

Las cunetas se deben localizar esencialmente en todos los cortes, en aquellos terraplenes susceptibles a la erosión y en toda margen interna de un separador que reciba las aguas de lluvias de las calzadas (ver figura 2).

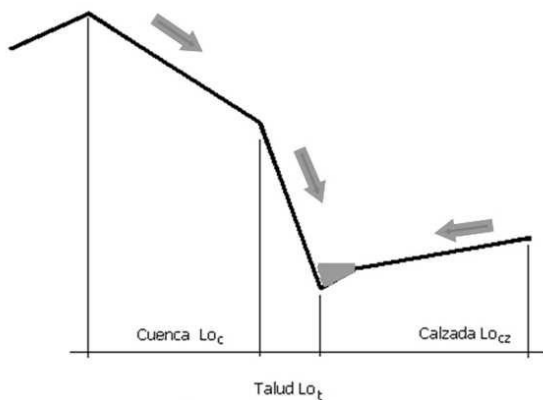


Figura 2. Detalle de cuneta y sus principales caudales de aporte (Fuente: Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América).

Cabe mencionar que las cunetas pueden tener diversas geometrías y pueden construirse con diversos materiales. Para el caso del presente proyecto, los diseños a utilizar presentan varias geometrías las cuales corresponden a las más usuales y óptimas, además de que se diseñaron solo las revestidas de concreto y las de tierra. Su longitud máxima

estará condicionada al caudal que transporta, su velocidad erosiva y su capacidad hidráulica.

Alcantarilla

Las alcantarillas corresponden a “toda estructura que tenga como función la de evacuar, desalojar o trasladar el flujo superficial proveniente de cualquier curso natural o artificial que atraviese o afecte al alineamiento y entorno de un proyecto vial”⁴. Dentro de los tipos se pueden mencionar las alcantarillas circulares de tubos transversales, secciones tipo cajón y las bóvedas.

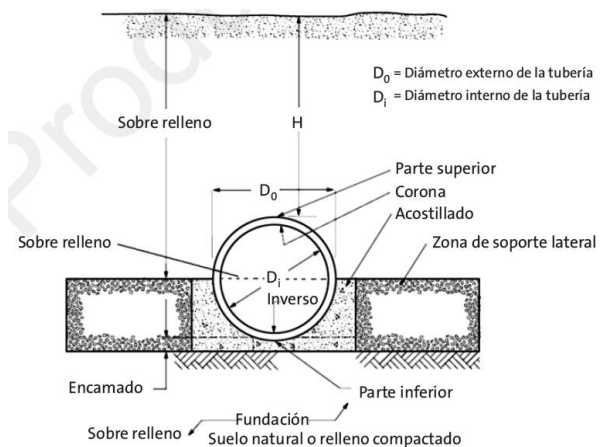


Figura 3. Detalle típico de alcantarilla y su instalación (Fuente: American Concrete Pipe Association “ACPA”).

Como recomendaciones para la ubicación de las alcantarillas a lo largo de la vía se definen los sitios de cruce con fuentes de agua permanente o intermitente, el cruce con yurros de invierno, acequias o desfuegos de aguas pluviales provenientes de alcantarillados y los sitios donde es necesario evacuar las aguas provenientes de las cunetas. Esta evacuación se hace mediante aliviaderos que llevan el agua a alcantarillas dispuestas para este fin.

Aliviadero o canales de entrada o salida

³ Fuente: “Ing de Caminos Rurales. AID”

⁴ Fuente: “Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para Vías con Bajos Volúmenes de Tránsito”

Es un “elemento constructivo utilizado para evacuar las aguas de las cunetas y llevarlas a la estructura de entrada o salida de una alcantarilla o a un sitio seguro donde no causen daños a la vía”⁵. Para este efecto se construyen canales de desvío llamados canales de entrada/salida o aliviaderos. Este canal puede construirse en diversos materiales como concreto reforzado, gaviones o se pueden revestir en mampostería con piedras. Pueden ir cimentarse directamente sobre el terreno natural o sobre los taludes de los terraplenes y generalmente en forma de grada que sirve de disipador de energía para disminuir la velocidad del agua y evitar la erosión en el sitio de entrega.

Se recomienda utilizar estos elementos en donde se cumpla con la longitud máxima de cuneta para disipar la velocidad erosiva o en el cabezal de salida de alguna alcantarilla y se requiera llegar a un desfogue con una longitud muy larga o con diferencias de niveles muy apreciables (ver figura 4).

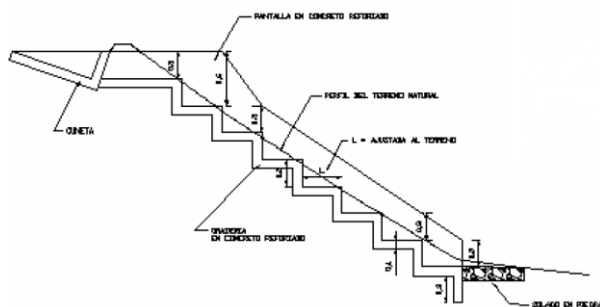


Figura 4. Perfil típico de aliviadero en grada (Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. Colombia).

Contracuneta

“Las contracunetas son zanjas, generalmente paralelas al eje de la carretera, construidas a una distancia mínima de 1.50 metros de la parte superior o a media altura de un talud en corte”⁶ (ver figura 5).

Su función es muy importante principalmente para aplicaciones de control de erosión y estabilidad de taludes. Se pueden

⁵ Fuente: “Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para Vías con Bajos Volúmenes de Tránsito”

⁶ Fuente: “Manual técnico: mantenimiento participativo en caminos rurales”

combinar con vegetación y malezas y con diversas aplicaciones geotécnicas como geotextiles de fibra de coco y suelos reforzados.

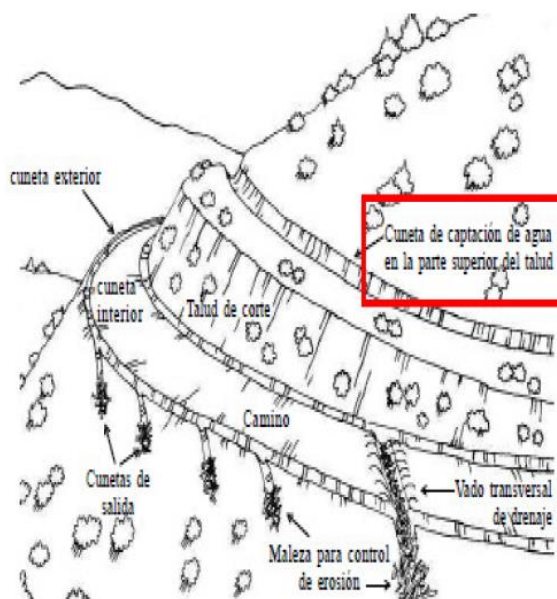


Figura 5. Detalle típico de contracuneta (Fuente: Keller y Sherar, 2003 USAID).

Cabezales

Son estructuras de concreto u otro material idóneo que se ubican en la entrada y en la salida de las alcantarillas. Buscan proteger los taludes de la socavación y encauzar las aguas, así como confinar las unidades de tubería y evitar su separación (ver figura 6).

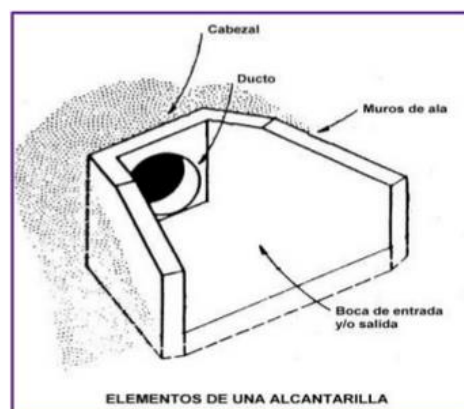


Figura 6. Detalle de cabezal (Fuente: Hidráulica aplicada. Hamilton Cueva Campos).

Complementariamente al sistema de drenajes superficial se requiere también de un análisis y diseño adecuado del sistema de drenajes subsuperficial (sub drenajes), a continuación los principales elementos que lo componen.

Drenaje subsuperficial

El drenaje subsuperficial es “aquel que se encarga de drenar todo flujo de agua del suelo que pueda afectar a la estructura vial o todo aquel flujo que por infiltración en los taludes o terraplenes de la vía puedan llegar a afectar la estabilidad de estos y de la vía”⁷.

Esto se consigue al interceptar el flujo de agua subterránea y hacer que el nivel freático descienda. De este tipo de drenaje se conocen los drenes longitudinales, transversales, horizontales, francés, sistemas de pozos verticales de alivio, cajas de registro y subdrenaje.

El sistema de drenaje subsuperficial debe ser una parte integral del sistema total de drenaje, ya que los drenes subsuperficiales deben operar en consonancia con el sistema de drenaje superficial para obtener un sistema general de drenaje eficiente.

El diseño de drenaje subsuperficial debe desarrollarse como una parte integral del diseño completo de la carretera, ya que un drenaje subsuperficial inadecuado también puede tener efectos dañinos sobre la estabilidad de los taludes y el desempeño del pavimento. Sin embargo, ciertos elementos de diseño de la carretera como la geometría y las propiedades de los materiales se requieren para el diseño del subdrenaje. Entonces, el procedimiento que generalmente se adopta para el diseño del subdren es determinar primero los requerimientos geométricos y estructurales de la carretera y luego someterlos a un análisis de dren subsuperficial para determinar los requerimientos del subdren. En algunos casos, los requerimientos del subdren van a requerir algunos cambios en el diseño original.

Por lo anterior, es importante realizar los estudios de geotecnia preliminar aplicados a la subrasante para posteriormente definir los tramos homogéneos de diseño y contemplar desde un

inicio los estudios necesarios para la definición de estas obras, como ampliar los estudios hidrológicos y geotécnicos para determinar los flujos subsuperficiales que puedan afectar la carretera o para determinar si el proyecto tendrá una cota de nivel de construcción en la cual se pueda tener afectación debido al nivel freático de la zona.

Para efectos de clasificar los sistemas de drenaje subsuperficial, se cuenta como referencia el que presenta Garber y Hoel en el cual se realiza una clasificación en cinco categorías generales (Garber & Hoel, 2007):

Drenes longitudinales

Los drenes longitudinales subsuperficiales generalmente “consisten en tubos colocados en trincheras, dentro de la estructura del pavimento y paralelos a la línea de ejes de la carretera”⁸.

Estos drenajes pueden usarse para abatir el nivel freático por debajo de la estructura del pavimento o para eliminar el agua que se infiltra hacia la sección estructural del pavimento (ver figura 7).

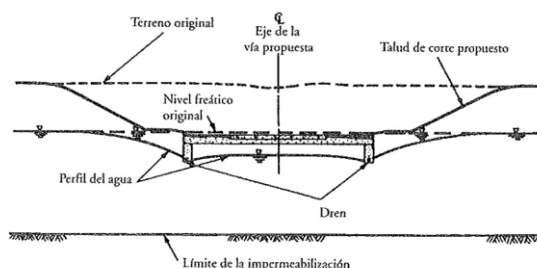


Figura 7. Drenes longitudinales para abatimiento de nivel freático (Fuente: Garber & Hoel, 2007).

En algunos casos cuando el nivel freático está muy elevado y la carretera es muy amplia, puede ser necesario usar más de dos filas de drenes longitudinales, para alcanzar la reducción requerida del nivel freático por debajo de la estructura del pavimento. Se recomienda que se reduzca el nivel freático como mínimo 60 cm por debajo de la estructura de pavimento.

⁷ Fuente: “Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América”

⁸ Fuente: “Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América”

Drenes transversales

Los drenes transversales se colocan en sentido transversal debajo del pavimento, generalmente en dirección perpendicular a la línea de eje, aunque pueden estar sesgados para formar una configuración de espina de pescado (ver figura 8). En la imagen se muestra un ejemplo del uso de drenes transversales, donde se emplean para drenar agua subterránea que se infiltró por las juntas del pavimento.

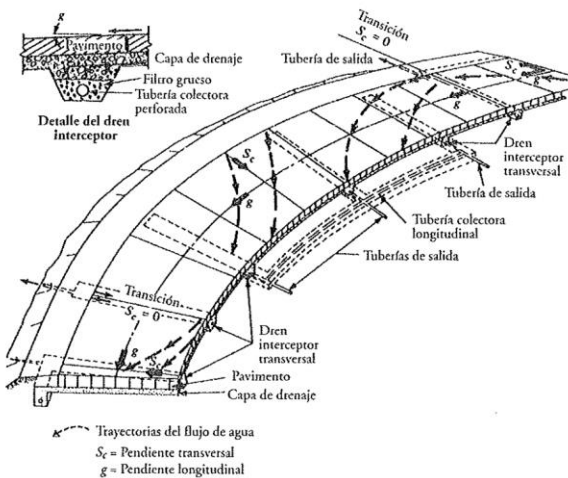


Figura 8. Drenes transversales en curvas peralteadas (Fuente: Garber & Hoel, 2007).

Drenes horizontales

Los drenes horizontales se usan para aliviar la presión de poro en los taludes de los cortes y los terraplenes de la carretera. Los drenes consisten en tubos perforados de pequeño diámetro que se insertan en los taludes del corte o del relleno. Los tubos colectan el agua subsuperficial que luego se descarga en la cara del talud mediante vertederos recubiertos hasta zanjas longitudinales.

Capas de drenaje o filtros tipo “francés”

Estas capas consisten en un “manto de material que tiene un coeficiente de permeabilidad muy alto (mayor que 914.4 cm/día (30 pies/día)), y es

colocado debajo o dentro de la estructura del pavimento, de modo que su ancho y su longitud en la dirección del flujo son mucho mayores que su espesor”⁹. Los filtros se pueden usar para facilitar el flujo del agua subsuperficial que se infiltró a través de grietas hacia la estructura del pavimento o el agua subsuperficial proveniente de las corrientes naturales de agua.

Una capa de drenaje también se puede usar conjuntamente con drenajes longitudinales para mejorar la estabilidad de los taludes, mediante el control del flujo de agua, lo que evita la formación de una superficie de deslizamiento (ver figura 9). A continuación se muestran dos sistemas de capas de drenaje:

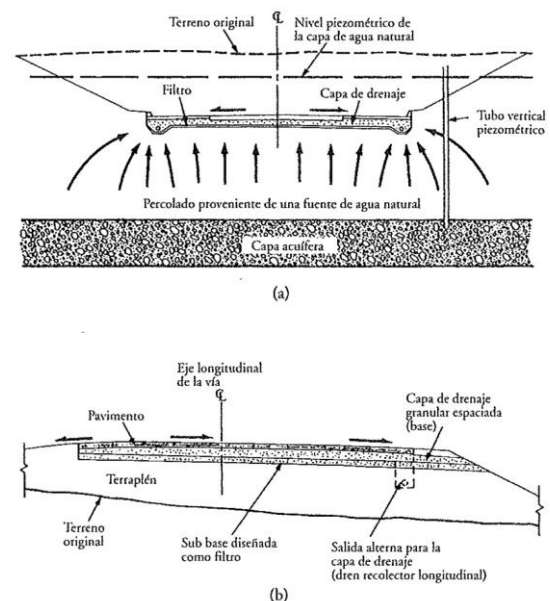


Figura 9. Aplicaciones de filtros en combinación con drenes longitudinales (Fuente: Garber & Hoel, 2007).

Sistemas de pozos

Un sistema de pozos “consiste en una serie de pozos verticales, perforados en el suelo, dentro de los cuales fluye el agua subterránea, abatiendo con ello el nivel freático y aliviando la presión de poro”¹⁰. Cuando se usan como medida temporal para la construcción, el agua colectada

⁹ Fuente: “Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América”

¹⁰ “Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América”

en los pozos se bombea continuamente hacia afuera o si no puede dejarse como derrame. Sin embargo, una construcción más común consiste en una capa de drenaje, ya sea en la parte superior o en la parte inferior de los pozos, para facilitar el flujo del agua colectada.

Para efectos del presente proyecto este tipo de sistemas no se implementará, sin embargo, es importante mencionarlo ya que puede ser una aplicación aceptable a utilizar durante el proceso constructivo de las obras.

Hidrología

La hidrología es la “ciencia que estudia las características y la distribución del agua en la atmósfera, en la superficie de la tierra y en el terreno”¹¹. El ciclo hidrológico se puede considerar uno de sus principales conceptos básicos. En este las precipitaciones son la causa del flujo en los ríos.

El estudio hidrológico es el primer estudio que se debe realizar para la definición y diseño de las obras de drenaje que se tienen que desarrollar en un proyecto vial. Para el análisis hidrológico se utiliza con mayor frecuencia el método racional.

Entre los elementos más importantes a tomar en cuenta en el estudio hidrológico están los siguientes:

Método racional

Esta relación empírica toma en cuenta el área de la cuenca, la altura o intensidad de la precipitación y las características de la superficie del terreno. Con estos datos se calcula la descarga máxima al asumir que la lluvia es uniforme en toda la cuenca y la descarga máxima se dará cuando la totalidad de la superficie esté drenando, es decir que el escurrimiento de la parte baja, de la parte media y de la parte más lejana de la cuenca se acumulan a la salida, lo que establece la máxima suma posible de volumen de agua.

Dado lo anterior, la duración de la lluvia se determinará a través del tiempo de

concentración de la cuenca con el objetivo de maximizar el caudal de diseño.

Este método se limita a un área máxima de la cuenca de “20km²”¹².

La siguiente corresponde a la expresión que permite el cálculo del caudal máximo:

$$Q_{hidrológico} = \frac{C * I * A}{3,6}$$

Donde:

Q, es la descarga máxima, en m³/s.

C, es el coeficiente de escorrentía, adimensional.

i, es la intensidad de la lluvia de diseño, en mm/h.

A, Área de la cuenca, en km².

Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía C se define como la “relación entre la tasa pico de escorrentía directa y la intensidad promedio de precipitación de una tormenta”¹³. También varía con el tiempo al variar la intensidad de lluvia. Es por esto que otra definición de C se expresa como la relación entre la escorrentía y la precipitación en un periodo de tiempo determinado.

Siempre se tiene que tener en cuenta que la proporción de lluvia que escurrirá dependerá de la pendiente del terreno, la porosidad y la permeabilidad del suelo, la vegetación, la posición del nivel freático, entre los factores más importantes. Además, la tasa de infiltración disminuye a medida que la lluvia continúa y también es influida por las condiciones de humedad antecedentes en el suelo.

A continuación, en las siguientes dos figuras se presentan datos de diversos coeficientes de escorrentía para zonas urbanas y rurales:

¹¹ Fuente: “Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América”

¹² Fuente: “Basso 1967 - 1972 (Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano, PHCA)”

¹³ Fuente: “Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América”

CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)					
	2	5	10	25	50	100
Áreas desarrolladas						
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)						
Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)						
Plano, 0 – 2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47
Promedio, 2 – 7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53
Pendiente superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55
Condición promedio (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)						
Plano, 0 – 2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41
Promedio, 2 – 7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49
Pendiente superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
Condición buena (cubierta de pasto mayor del 75% del área)						
Plano, 0 – 2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36
Promedio, 2 – 7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46
Pendiente superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51
Áreas no desarrolladas						
Área de Cultivo						
Plano, 0 – 2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47
Promedio, 2 – 7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51
Pendiente superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54
Pastizales						
Plano, 0 – 2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41
Promedio, 2 – 7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49
Pendiente superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
Bosques						
Plano, 0 – 2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39
Promedio, 2 – 7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47
Pendiente superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52

Figura 10. Coeficientes de escorrentía recomendados para ser usados en el método racional para zonas urbanas (Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994).

COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO PARA ÁREAS NO DESARROLLADAS O RURALES (1)				
TIPOS DE CUENCAS				
	EXTREMO	ALTO	NORMAL	BAJO
Relieve	0.28 – 0.35 Empinada, terreno escarpado con pendientes promedio por encima del 30%	0.20 – 0.28 Montañoso, con pendientes promedio del 10 al 30%	0.14 – 0.20 Ondulado con pendientes promedio del 5 al 10%	0.08 – 0.14 Tierras relativamente planas, con pendientes promedio del 0 al 5%
Infiltración del suelo	0.12 – 0.16 Cubierta de suelo ineficiente, con cualquiera de los dos roca o manto de suelo delgado de capacidad de infiltración despreciable	0.08 – 0.12 Lento para tomar agua, arcilla o tierra negra, suelos superficiales de baja capacidad de infiltración, imperfecta o pobremente drenados	0.06 – 0.08 Normal, suelos con textura de suelos ligeros a medianamente bien drenados, arenas arcillosas, limos y limos arcillosos	0.04 – 0.06 Altos, arenas profundas u otros suelos que guardan agua rápidamente, suelos muy ligeros bien drenados
Cobertura vegetal	0.12 – 0.16 Cubierta de plantas ineficiente, desnudo o muy dispersa	0.08 – 0.12 De mala a regular, cultivos limpios, o cubierta natural pobre, menos que el 20% del área de drenaje con buena cubierta	0.06 – 0.08 De regular a bueno, alrededor del 50% del área con tierras cubiertas de grama o bosques, no más del 50% con áreas en la producción de cosechas	0.04 – 0.06 Buena a excelente, acerca del 90% del área de drenaje o buenos pastizales, bosques o albaledos o cubiertas equivalentes
Almacenaje superficial	0.10 – 0.12 Depresiones superficiales despreciables pocas y planas; drenajes empinados y cortos, sin pantanos	0.08 – 0.10 Bajo sistemas cortos de drenajes bien definidos, sin lagunas ni pantanos	0.06 – 0.08 Normal, considerables depresiones superficiales, lagos y pantanos	0.04 – 0.06 Alto, superficie de almacenaje alta, sistema de drenaje no bruscamente definido, grandes planicies de inundación o gran número de lagunas o pantanos
Ejemplo	Dado: Una cuenca rural consistente de 1) terreno ondulado con pendientes promedio del 5%, 2) tipos de suelos arcillosos, 3) Área de pastizales, y 4) depresiones superficiales normales. Encuentre el coeficiente de escurrimiento, C, para la cuenca señalada arriba			
	Solución: 0.14			
	Relieve: Infiltración del suelo: 0.08 Cubierta vegetal: 0.04 Superficie de almacenaje: 0.06 C = 0.32			

Figura 11. Coeficientes de escorrentía recomendados para ser usados en el método racional para zonas rurales (Fuente: Manual de Diseño de Carreteras. Departamento de Transporte de California).

Intensidad de lluvia

La intensidad de la lluvia es función de la frecuencia o periodo de retorno de la tormenta o aguacero de diseño y de su duración. En el caso crítico, la duración de la lluvia se toma igual al tiempo de concentración del área tributaria. Para determinar la intensidad de la lluvia se requiere la información meteorológica propia del área en donde se localiza el proyecto, por ejemplo, las curvas estándar de intensidad duración-frecuencia del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) o las ecuaciones de cálculo de intensidad de lluvia para cada zona.

Periodo de retorno

El periodo de retorno es la frecuencia de retorno de la precipitación de diseño. Se determinará de acuerdo con los daños, perjuicios o molestias que inundaciones periódicas pueden ocasionar a una obra de drenaje en específico. Se recomiendan los siguientes valores:

5 años: Para diseño de sistemas de alcantarillado pluvial en urbanizaciones.

25 años: Para diseño de alcantarillas.

50 años: Para diseño de puentes.

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (t_c) se define como el “tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca aporten agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida de ésta”¹⁴. Lo determina el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante. El punto hidrológicamente más alejado es aquel desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida.

Este valor puede obtenerse a través la ecuación de “Kirpich-Ramser”, que es la más utiliza el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) en Costa Rica. Sin embargo, en la literatura se encuentran muchas expresiones para determinar el tiempo de

¹⁴ Fuente: “Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América”

concentración de las cuencas hidrográficas que se desarrollan en diferentes partes del mundo. En caso de no contar con una expresión desarrollada localmente se puede adoptar alguna que se haya desarrollado en otro lugar. Se deben tener en cuenta las condiciones en las que fue desarrollada y que mejor aplique al contexto del proyecto:

$$T_c = 0,0195 * \left(\frac{L}{\Delta H} \right)^{0,385}$$

Donde:

t_c , es el tiempo de concentración, en minutos.

L , longitud del punto más lejano de la cuenca, en metros.

ΔH , es la diferencia de altura.

Con todos estos valores definidos se procede a obtener el caudal hidrológico para cada uno de los elementos constructivos que forman parte de los sistemas de drenaje, posteriormente se procederá a definir los principales fundamentos del diseño hidráulico, el cual deberá de ser mayor o igual a 1,05 veces el caudal hidrológico.

Diseño Hidráulico

El diseño hidráulico es relevante ya que tiene la función principal de evacuar o trasladar un caudal determinado, por lo que es importante tener establecidos y realizados los cálculos hidrológicos necesarios para este fin, junto con todas las consideraciones a tomar. Como se mencionó anteriormente, para efectos del presente proyecto se utilizó la ecuación de *Manning*¹⁵ que describe el flujo permanente y uniforme para el diseño de canales abiertos, en este caso las alcantarillas y las cunetas se pueden considerar canales abiertos.

Ecuación de Manning

El diseño hidráulico para la determinación de las capacidades hidráulicas de los elementos de

drenaje superficial del presente proyecto se realizó por medio de la ecuación de *Manning*, la cual requiere que trabaje como un canal abierto. Por consiguiente, es necesario establecer una altura máxima del nivel de agua en la tubería, inferior al diámetro de esta y se asume que el flujo es uniforme.

Se recomienda que el tirante máximo de la alcantarilla no sobrepase el 0.75d del diámetro interno de la alcantarilla y para el diseño de cunetas se considera que el tirante máximo no sobre pase el 0.9h.

La ecuación de *Manning* para obtener la velocidad del flujo y el caudal para una condición del régimen uniforme es mediante la siguiente relación:

$$V = \frac{R^{2/3} * S^{1/2}}{n}$$

Donde:

V , la velocidad del flujo, en m/s.

n , el coeficiente de rugosidad de Manning, cuyos valores recomendados pueden obtenerse de la figura 12.

R , el radio hidráulico, en m (se definirá posteriormente)

S , la pendiente del conducto, en m/m.

TIPO DE CANAL Y DESCRIPCION	MINIMO	NORMAL	MAXIMO
Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos			
Metal			
Acero			
Estriado soldado	0.010	0.012	0.014
Ribeteado y en espiral	0.013	0.016	0.017
Hierro fundido			
Recubierto	0.010	0.013	0.014
No recubierto	0.011	0.014	0.016
Hierro forjado			
Negro	0.012	0.014	0.015
Galvanizado	0.013	0.016	0.017
Metal corrugado			
Subdrenaje	0.017	0.019	0.021
Drenaje de aguas lluvias	0.021	0.024	0.030
No metal			
Cemento			
Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
Mortero	0.011	0.013	0.015
Concreto			
Alcantarilla recta y libre de basuras	0.010	0.011	0.013
Alcantarilla con curvas, conexiones y algo de basuras	0.011	0.013	0.014
Bien terminado	0.011	0.012	0.014
Alcantarillas de aguas residuales	0.013	0.015	0.017

Figura 12. Coeficientes n de Manning (Fuente: Chow, 2004).

Una vez que se establece la velocidad del flujo por medio de la ecuación de continuidad se determina la capacidad del conducto. Esta capacidad se determina de la siguiente manera:

¹⁵ Fuente: "Ministerio de Transporte y Comunicaciones, Perú, 2008"

$$Q = V * A$$

Donde:

Q, caudal, en m3/seg.

A, el área hidráulica del conducto en m2.

V, es la velocidad del flujo, resultado de la aplicación de la fórmula de Manning.

Posteriormente es necesario verificar que la velocidad del flujo se encuentre dentro de ciertos límites debido a que se pueden originar afectaciones en la estructura. A continuación, en la figura 13 se presentan los valores recomendados para definir las velocidades erosivas en canales revestidos:

TIPO DE REVESTIMIENTO	VELOCIDAD (m/s)
Concreto	3.0 – 6.0
Ladrillo con concreto	2.5 – 3.5
Mampostería de piedra y concreto	2.0

Figura 13. Velocidades máximas admisibles (m/s) en conductos revestidos (Fuente: Hcanales, Máximo Villón Bejar).

También se deberá verificar que la velocidad mínima del flujo para canales de tierra no produzca sedimentación que pueda incidir en una reducción de su capacidad hidráulica. Se recomienda que la velocidad mínima dependerá del tipo de material de la alcantarilla y para evitar efectos de sedimentación se recomienda una pendiente mínima de 0.5 %. A continuación se presentan los valores máximos para velocidades erosivas en canales de tierra:

TIPO DE TERRENO	FLUJO INTERMITENTE (m/s)	FLUJO PERMANENTE (m/s)
Arena fina (no coloidal)	0.75	0.75
Arcilla arenosa (no coloidal)	0.75	0.75
Arcilla limosa (no coloidal)	0.9	0.9
Arcilla fina	1.0	1.0
Ceniza volcánica	1.2	1.0
Grava fina	1.5	1.2
Arcilla dura (coloidal)	1.8	1.4
Material graduado (no coloidal)		
Desde arcilla a grava	2.0	1.5
Desde limo a grava	2.1	1.7
Grava	2.3	1.8
Grava gruesa	2.4	2.0
Desde grava a piedras (<15 cm)	2.7	2.1
Desde grava a piedras (> 20 cm)	3.0	2.4

Figura 14. Velocidades máximas admisibles (m/s) para canales no revestidos (Fuente: Manual de Carreteras de California).

Propiedades geométricas de los canales más comunes

A continuación se presenta en la figura 15 los datos de las propiedades geométricas hidráulicas de los tipos de canales más usuales en carreteras, mismos que son necesarios para el cálculo de las capacidades hidráulicas de los elementos constructivos:

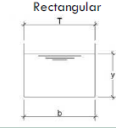
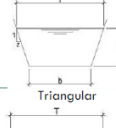
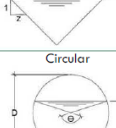
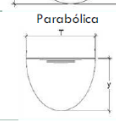
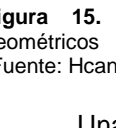
SECCIÓN	ÁREA HIDRÁULICA (A)	PERÍMETRO MOJADO (P _m)	RADIO HIDRÁULICO (R _a)	ESPEJO DE AGUA (T)
Rectangular	 by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b
Trapezoidal	 $(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$
Triangular	 zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$
Circular	 $\frac{(\theta - \sin \theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$\left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)\frac{D}{4}$	$\left(\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}}\right)\frac{D}{2\sqrt{y(D - y)}}$
Parabólica	 $\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Figura 15. Fórmulas para obtención de parámetros geométricos de distintas secciones de canales abiertos (Fuente: Hcanales, Máximo Villón Bejar).

Una vez que se define el caudal hidrológico y el caudal hidráulico, se debe satisfacer como mínimo la siguiente inequación, en la cual la capacidad del elemento que se seleccionó debe superar el caudal hidrológico que le va a llegar:

$$Q_{hidráulico} \geq 1,05 * Q_{hidrológico}$$

Este valor puede ser variable, depende del criterio del diseñador, sin embargo, para efectos del diseño de los sistemas de drenaje se tomará este dato que es el que usualmente utiliza el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT).

Diseño de subdrenajes

Para el diseño de los drenes existen varios componentes a diseñar. Para el presente proyecto se trabajarán bajo la metodología de diseño de un “filtro francés”¹⁶, en el cual se tiene en cuenta el caudal de infiltración y el caudal por abatimiento del nivel freático.

El caudal total aferente al filtro es igual a:

$$Q_f = Q_{nf} + Q_{inf}$$

Donde:

Q_f , caudal aferente al filtro, cm^3/s .

Q_{nf} , caudal por abatimiento del nivel freático, cm^3/s .

Q_{inf} , caudal por infiltración, cm^3/s .

El caudal por abatimiento del nivel freático es igual a:

$$Q_{nf} = k * i * Aa$$

Donde:

K : Coeficiente de permeabilidad del suelo adyacente, cm/s .

Aa : Área efectiva aferente al filtro para el caso de abatimiento del nivel freático, cm^2 .

i : Gradiente hidráulico, m/m . El cual a su vez se determina de la siguiente manera:

$$i = \frac{(Nd - Nf)}{B}$$

Donde:

Nd , cota inferior del filtro necesaria para que el nivel freático no sobrepase la subrasante.

Nf , cota superior del nivel freático.

B , ancho de la semibanca de la vía, m .

Además:

$$Aa = (Nd - Nf) * L$$

Donde:

L , longitud máxima de recorrido del filtro entre cajas de desfogue, cm .

En cuanto al caudal por infiltración, este se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{inf} = I_r * B * L * Fi * Fr$$

Donde:

I_r , precipitación máxima horaria de frecuencia anual registrada en la zona de proyecto.

Usualmente se toma el intervalo entre 60 y 120 min, y se escoge la curva de 2 años.

Para la zona del proyecto, I_r adopta valores que oscilan entre 90 a 36 mm/h .

B , ancho de la semibanca de la vía, m .

L , longitud del tramo de drenaje, cm .

Fi , factor de infiltración, dependiente del tipo de carpeta de la vía.

FR , factor de retención de la capa granular.

Para las dimensiones de la sección transversal, con el caudal total aferente al filtro Q_f , se realiza el siguiente procedimiento, con la siguiente ecuación:

$$Q_f = V_i * A$$

Donde:

Q_f , caudal total aferente al filtro, cm^3/s .

V_i , velocidad de flujo dentro del filtro, la cual depende de la pendiente longitudinal y del tamaño del agregado usado en el filtro, cm/s .

De esta manera, A es igual a:

$$A = Q_f / V_i$$

Además:

$$A = H * B'$$

$$B' = A / H$$

Donde:

B' , ancho del filtro, m .

H , altura del filtro, m .

¹⁶ Fuente: “Manual de Consideraciones Técnicas, Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centro América”

Subrasante

La Sub-rasante, se define como la “parte de la corteza terrestre, que le va a servir de soporte a la estructura del pavimento”¹⁷; puede ser sub-rasante natural (en el caso de los cortes), puede constituirse en el sitio (artificial, para los terraplenes) o mejorada cuando la misma presenta problemas de capacidad de soporte, o sea subrasantes débiles. Este tipo de subrasantes para efectos del presente proyecto se presentan cuando tengan un $\text{CBR} \leq 4 \%$ y se pueden tratar con cemento o cal.

Unidades homogéneas de diseño

Son zonas longitudinales que guardan homogeneidad en parámetros de gran trascendencia en el comportamiento de los pavimentos, como:

- Condiciones geológicas
- Condiciones topográficas
- Tipos de suelo
- Condiciones de drenaje
- Condiciones ambientales

Las unidades homogéneas de diseño se pueden determinar con base en estudios preliminares, exploraciones en la zona o fotografías aéreas.

Dentro de los estudios preliminares se pueden encontrar:

- Clasificación geológica
- Clasificación geotécnica preliminar
- Clasificación geotécnica definitiva
- Análisis de estabilidad volumétrica
- Evaluación de condiciones de drenaje

Clasificación geológica

Un estudio geológico permite determinar la presencia de fallas geológicas, tipos de formaciones geológicas, tipos de suelos originados por esas formaciones y la posibilidad de utilización de materiales para la estructura.

¹⁷ Fuente: “Materiales, construcción y diseño. Fredy Alberto Reyes Lizcano”

Clasificación geotécnica preliminar

La finalidad de este estudio es determinar el perfil estratigráfico deducido y la posición del nivel freático (proyección de obras de sub-drenaje). Se hacen sondeos hasta una profundidad de 2.00m por debajo de la rasante, si el suelo es propicio y homogéneo. El espaciamiento longitudinal de los sondeos está en función de la uniformidad del suelo e importancia del proyecto. Se recomienda un sondeo cada 250 m en carreteras y un sondeo cada 50 m en aeropuertos.

En un sondeo se evalúan límites de consistencia (condiciones de plasticidad) y humedad natural (en la profundidad). Si el suelo es granular, se realizan ensayos de granulometría.

Interpretación de resultados

La información que se obtiene en campo y laboratorio debe permitir realizar:

1. Descripción y ubicación del sondeo: a cada sondeo se hace una descripción visual de los materiales presentes en la excavación que se realizó.
2. Perfil estratigráfico deducido: con sus respectivos espesores y tipo de suelo e identificando la posición del nivel freático. Debe existir un registro de la información de estos sondeos.
3. Variación del nivel de aguas freáticas: de acuerdo a la respectiva época climática del año a la cual se asocia.
4. Perfil deducido de humedades (variación longitudinal y vertical): con el cual se deben detectar sitios críticos definidos y localizados exactamente, para contemplar obras de sub-drenaje, además para optar una humedad representativa de la unidad de diseño (Ver figura 16).

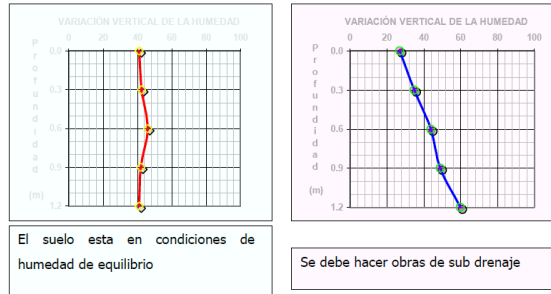


Figura 16. Comparación de variaciones verticales de la humedad (Fuente: Materiales, construcción y diseño. Fredy Alberto Reyes Lizcano).

5. Análisis de consistencia del suelo, se comparan los perfiles de humedad natural o su variación con los límites de consistencia de cada suelo.

El conocimiento de la humedad natural de un suelo no solo permite definir *a priori* el tratamiento que se le debe dar durante la construcción, sino que también permite estimar su posible comportamiento como subrasante (si el contenido natural de agua de un suelo está próximo al límite líquido, es casi seguro que se trata con un suelo muy sensitivo y si, por el contrario, el contenido de agua es cercano al límite plástico, puede anticiparse que el suelo presentará un buen comportamiento). Los valores de la humedad natural de un suelo siempre deben relacionarse a los límites de consistencia de dicho suelo, para que esta humedad tenga utilidad en los análisis.

6. Ubicar las condiciones de plasticidad de cada suelo en la carta de plasticidad de Casagrande, para identificar familias de suelos y puntos críticos (ver figura 17).

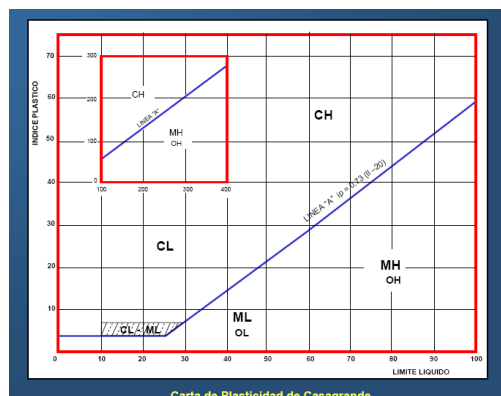


Figura 17. Carta de plasticidad (Fuente: Casa Grande).

Clasificación geotécnica definitiva

Se usa para el diseño de la estructura del pavimento para determinar las condiciones de resistencia de la sub-rasante en cada una de las unidades homogéneas (ver figura 18). Para su evaluación se realizan una serie de calicatas (perforaciones de 1.20 m * 0.70 m), con el fin de extraer muestras representativas.

La dimensión de la calicata depende de la cantidad de material a extraer. Generalmente se llega hasta una profundidad de 2.00 m por debajo del nivel de rasante del proyecto. En estratos uniformes en profundidad, los primeros 50 cm se hacen de área superficial grande, luego se continúa como si fuese un sondeo, ya que solo interesa la condición de la parte superior.

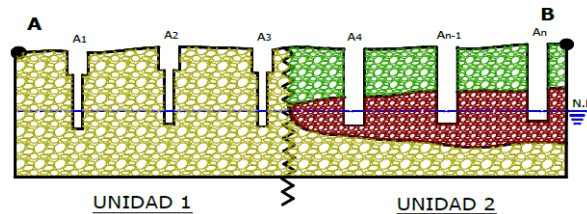


Figura 18. Ejemplo de unidades homogéneas.

El objetivo principal de las calicatas es conocer las características de resistencia del suelo, que está en función de la humedad natural y de su densidad. Se debe tratar de que coincida la ubicación de las calicatas con los estacionamientos de los sondeos. El espaciamiento entre calicatas depende del perfil estratigráfico. Como recomendación se debe tratar de hacer una calicata por kilómetro lineal, aunque se pueden definir sus separaciones con base en los siguientes criterios:

- Perfil estratigráfico deducido del estudio geotécnico preliminar
- Condiciones de consistencia del suelo
- Características de humedad y plasticidad
- Condiciones excepcionales

Para cada uno de los apiques de la unidad de diseño se evalúa:

- Condiciones de humedad y plasticidad
- Condiciones granulométricas
- Condiciones de Compactación

Se tiene entonces como referencia para obtener el nivel de compactación del suelo existente:

- Para Suelo Expansivo: Próctor Estándar
- Para Suelo no expansivo: Próctor Modificado
- Densidad de Campo
- Condiciones de Resistencia a la compresión
- Grado de densidad natural:

Este parámetro es de gran utilidad para verificar si el suelo es necesario escarificarlo o dejarlo tal como está. Para esto es conveniente realizar las siguientes comparaciones:

- Si GC \approx 95%: Hacer un CBR in situ, ya que la sub-rasante no se escarifica.
- Si GC < 92%: Hacer un CBR de laboratorio, suelo remoldeado.
- Para valores intermedios se puede pensar en compactar el suelo, para llegar a las densidades que se especificaron.

Análisis de estabilidad volumétrica

La inestabilidad volumétrica y deformabilidad de los suelos de sub-rasante perjudican las capas inferiores de la estructura de los pavimentos. Se deben controlar los fenómenos de contracción y de expansión evaluándose mediante ensayos de laboratorio para estimar la susceptibilidad de su suelo y cuantificar los cambios volumétricos.

Si al final del análisis de estabilidad volumétrica del suelo se concluye que el suelo es expansivo, se debe pensar en sustituir el suelo o en estabilizarse. En las siguientes figuras se presentan las recomendaciones para determinar el grado de peligrosidad en función de la expansividad del suelo:

Parámetro	Nula	Marginal	Crítica	Muy Crítica
Límite líquido LL	<30	30-40	40-60	>60
Índice de Plasticidad IP	0-15	10-35	20-55	>45
%<1µm	<15	13-23	23-30	>28
%<0,074µm	<30	30-60	60-95	>90
Índice PVC de Lambe	<2	2-4	4-6	>6
Índice de desecación ID	>1	0,8-1	0,6-0,8	<0,6

ESTIMACIÓN DE LOS CAMBIOS DE VOLUMEN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS (HOLTZ Y GIBBS)				
Contenido Coloidal %<0,001mm	Índice de Plasticidad	Límite de Retracción	Expansión Probable. Cambio Volumétrico %	Grado de expansión
>28	>35	>11	>30	muy alto
20-13	25-41	7-12	20-30	alto
13-23	15-28	10-16	10-30	medio
<15	<18	<15	<10	bajo

Figura 19. Criterios de peligrosidad de subrasantes (Fuente: Arcillas expansivas: su estudio y patología. Emilio Yanes).

ESTIMACIÓN DE LOS CAMBIOS DE VOLUMEN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS (HOLTZ Y GIBBS)				
Contenido Coloidal %<0,001mm	Índice de Plasticidad	Límite de Retracción	Expansión Probable. Cambio Volumétrico %	Grado de expansión
>28	>35	>11	>30	muy alto
20-13	25-41	7-12	20-30	alto
13-23	15-28	10-16	10-30	medio
<15	<18	<15	<10	bajo

CRITERIOS DE EXPANSIVIDAD SEGÚN CHEN				
% Pasa por Tamiz 200	Límite líquido	S.P.T.	Expansión Probable %	Presión de Hinchamiento
>95	>60	>30	>10	>10
60-95	40-60	20-30	3-10	2,5-10
30-60	30-40	10-20	1-5	1,5-2,5
<30	<30	<10	<1	<0,5

Figura 20. Criterios de peligrosidad de subrasantes (Fuente: Arcillas expansivas: su estudio y patología. Emilio Yanes).

Como recomendación cuando un suelo tenga un CBR inferior a cinco, es preferible sustituir dicho material por uno de mejor calidad o tratar la plataforma en el sitio con cal, cemento o geotextil.

Se debe tratar de eliminar suelos que presenten las siguientes características geotécnicas:

- "IP (índice de plasticidad) > 40
- LL (Límite líquido) > 70
- Expansión lineal en molde de CBR > 2 %
- Contenido de materia orgánica > 3 %"¹⁸

Cuando el suelo natural presenta insuficiente capacidad portante y se va a sustituir, es necesario que el material de sustitución tenga un CBR \geq 10.

Evaluación de condiciones de drenaje

El manejo del agua es determinante en el comportamiento de los pavimentos.

El agua produce: variaciones en la resistencia, inestabilidad volumétrica, deformabilidad, fenómeno de bombeo.

Se debe contemplar el diseño y construcción de obras de drenaje superficial y de sub-drenaje y se deben seguir los lineamientos que se mencionaron anteriormente en el área de drenajes.

¹⁸ Fuente: "CEJA. Colombia. 2005. Fredy Alberto Reyes Lizcano"

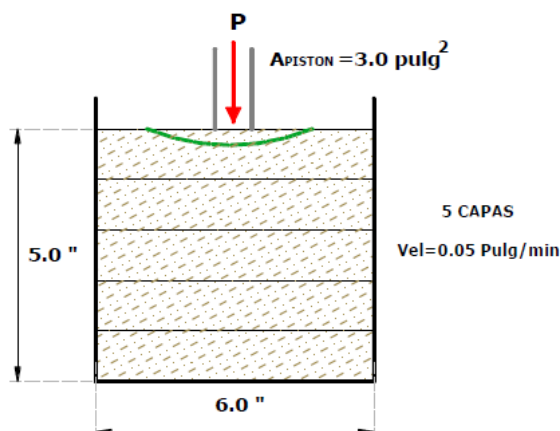
Parámetros para evaluar la capacidad de soporte de los suelos

Para determinar en forma directa los parámetros de resiliencia o capacidad de soporte de los suelos se pueden utilizar los siguientes ensayos:

- CBR
- Ensayo de placa
- Modulo Resiliente
- DCP

Ensayo CBR (California Bearing Ratio)

Es una medida indirecta de la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones controladas de densidad y humedad, valor que se expresa como una relación porcentual entre el esfuerzo requerido para penetrar un pistón de 3 Pulg² de área dentro de una probeta de suelo de 6 pulg de diámetro y 5 pulg de altura, la cual se penetra a una velocidad de 0.05 pulg/min y el esfuerzo que se requiere para introducir el mismo pistón hasta la misma profundidad en una muestra patrón.



El valor de CBR en suelos no estabilizados, se determina a 0.1" y 0.2" de deformación, porque a esos niveles son las solicitaciones normales que soportan los suelos.

En los suelos estabilizados el valor de CBR se determina para una deformación de 0.4" y 0.5".

Relaciones Esfuerzo-Deformación para la muestra patrón

La muestra patrón corresponde a una grava triturada bien gradada, con las siguientes relaciones entre esfuerzo y deformación asociada:

PENETRACIÓN (Pulg)	ESFUERZO (PSI)
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

Figura 21. Relaciones de esfuerzo-deformación de la muestra patrón (Fuente: Materiales, construcción y diseño. Fredy Alberto Reyes Lizcano).

A continuación se describen los diferentes tipos de ensayos de CBR:

CBR de laboratorio

Se recomienda su ejecución cuando las condiciones en la sub-rasante se van a alterar durante la construcción.

CBR de muestra inalterada

Se recomienda sobre suelos finos, arenosos o suelos granulares con matriz fina, cuando las condiciones de la sub-rasante no se van a alterar.

CBR de campo

Se realiza directamente en el sitio sobre suelos finos y arenosos, cuando las condiciones de la sub-rasante no se van a alterar durante la construcción.

CBR In Situ

Es la medición indirecta de la resistencia al corte del suelo, directamente en el sitio, sobre suelos finos y arenosos o grupos con matriz fina importante. Se recomienda cuando la sub-rasante no se va a alterar durante la construcción o cuando el suelo se altera, se compacta y luego se determina el CBR, como ensayo de comprobación de la resistencia. Se necesita llevar el equipo de penetración y deformación directamente al sitio y el valor del CBR se asocia a la humedad y densidad del suelo en estado natural.

Criterios para la determinación de CBR

1er Criterio: Determinar el CBR para las condiciones que se esperan obtener en obra, siempre y cuando las circunstancias de humedad garanticen expansiones menores al 2 %. Se debe tener en cuenta que expansiones de la sub-rasante mayores al 2 % se reflejan en la rugosidad del pavimento.

Condiciones reales de obra según datos del apique y % W campo se chequea con %W < 2% expansión.

2do Criterio: Diseñar el CBR para las condiciones de humedad de equilibrio y densidad de equilibrio, que son las condiciones que a través del tiempo de servicio adquieren los suelos y es función de la acción del tránsito y del clima, características de compactación del suelo, plasticidad y granulometría del suelo, características de peso específico y densidad suelta.

La siguiente tabla sugiere la calidad de los materiales de acuerdo al valor del CBR:

Valor de CBR (%)	Calificación
< 2	Muy bajo ⁽¹⁾
3 – 4	Bajo ⁽²⁾
5 – 8	Medio ⁽³⁾
9 – 14	Alto
> 15	Muy alto

Figura 22. Calidad de suelos en función de CBR (Fuente: Curso virtual de pavimentos. Ing Mario Ace).

(1): Este tipo de suelos blandos normalmente se sustituyen por otros de mejor calidad.

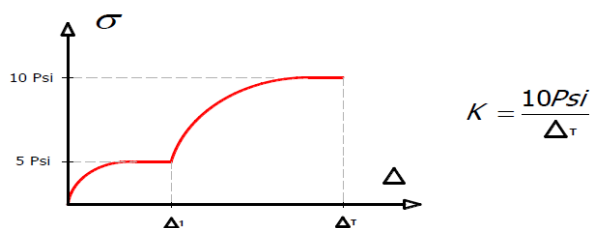
(2) y (3): La capacidad de soporte de estos suelos se puede incrementar de forma significativa al adicionar cal, cemento o aditivos químicos (suelos estabilizados).

Ensayo de placa

El objetivo de este ensayo es evaluar la capacidad de soporte de: sub-rasantes más el suelo debajo de él, capas granulares más el suelo en que estas se apoyen, pavimentos existentes etc., mediante la determinación del módulo de reacción del conjunto o "Kconjunto".

Definición de K: Parámetro que relaciona la presión necesaria para producir una deformación unitaria dada, de un disco metálico de 1" de altura y 30" de diámetro. Su unidad de medida es el Pci ó Psi/pulg (lb/pulg³).

Ejemplo:



En el sitio donde se realizará el ensayo se coloca una capa de arena de aproximadamente 2 mm de espesor, para garantizar el apoyo uniforme de la placa (no se coloca en carpetas), además el sitio debe estar nivelado. El K se puede medir sobre cualquier capa de un pavimento flexible, con la salvedad de

no poder medirse sobre las losas, en pavimentos rígidos.

Módulo Resiliente

“Es una relación, que vincula las solicitaciones aplicadas (esfuerzos) y las deformaciones asociadas recuperables al suprimirse el estado de tensiones impuesto; a medida que el suelo soporta esfuerzos, la deformación plástica desaparece paulatinamente, hasta llegar al estado resiliente, en donde el material responde completamente en comportamiento elástico”¹⁹. La ecuación básica sería la siguiente:

$$Mr = \frac{\sigma}{\epsilon_{recuperable}}$$

La resiliencia es una propiedad del suelo para absorber energía cuando se deforma elásticamente, y devolver dicha energía cuando se descarga. El módulo resiliente de un material depende de los esfuerzos que llegan a un determinado punto del suelo, lo que implica que la magnitud de los módulos varía en la profundidad de las capas. Para la determinación de los módulos resilientes se pueden realizar de las siguientes formas:

- Ensayos triaxiales dinámicos (AASHTO T307)
- Correlaciones

Ensayos triaxiales para materiales granulares y suelos (AASHTO T307)

Su objetivo es determinar la ecuación constitutiva del material. Se aplican esfuerzos axiales cíclicos repetitivos (σ_d) de magnitud y duración definida, al mismo tiempo que se le aplica un esfuerzo de confinamiento estático (σ_c) provisto por una cámara triaxial.

En la siguiente figura se puede obtener un esquema representativo del ensayo:

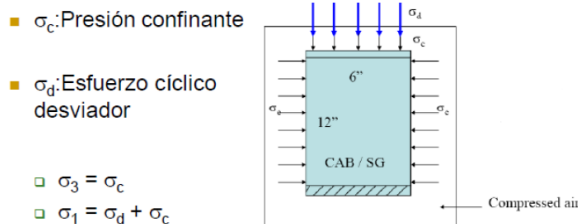
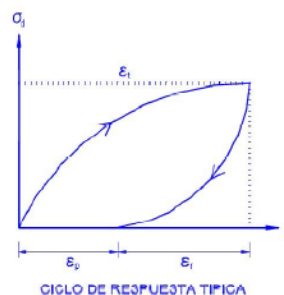


Figura 23. Esquema de ensayo triaxial (Fuente: Módulo I Espec. Pavimentos. 2010. Ing. Fabián Elizondo. Lanamme UCR).

La deformación axial resiliente (recuperable) total del espécimen se mide y utiliza para calcular el módulo resiliente por medio de la siguiente ecuación:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$



Módulo de resiliencia para materiales granulares

Se debe determinar la ecuación constitutiva para los materiales granulares que formarán parte de la estructura de pavimento, la cual corresponde a la siguiente:

$$Mr = k_1 * \theta^{k_2}$$

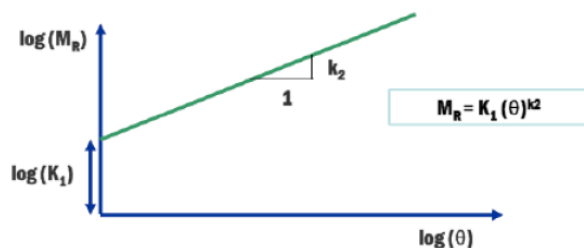
Donde:

θ , variante de esfuerzos = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$.

k_1 y k_2 , constantes derivadas experimentalmente.

La siguiente gráfica muestra la relación entre las diferentes variables:

¹⁹ Fuente: “Módulo I Espec. Pavimentos. 2010. Ing. Fabián Elizondo. LANAMME”



El módulo resiliente de los materiales granulares es altamente dependiente del estado de esfuerzos al cual se encuentran sometidos. Diferente a lo que sucede en los suelos finos, los materiales granulares exhiben endurecimiento por esfuerzos lo que hace que el módulo se incremente con los esfuerzos totales debido a que se incrementa la trabazón entre las partículas individuales del agregado. El módulo resiliente de un material granular se afecta adversamente por la presencia de partículas finas.

Módulo de resiliencia para suelos finos

El módulo de resiliencia de suelos finos decrece con el incremento en el esfuerzo desviador σ_d , en el laboratorio $\sigma_2 = \sigma_3$, por lo tanto el esfuerzo desviador se puede definir como: $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$.

Se debe determinar la ecuación constitutiva para los materiales finos, la cual corresponde a la siguiente:

$$Mr = A * \sigma_d^B$$

Donde:

A, constantes.

B, constantes.

La siguiente gráfica muestra la relación módulo de resiliencia (M_r) en comparación con el esfuerzo desviador (σ_d):

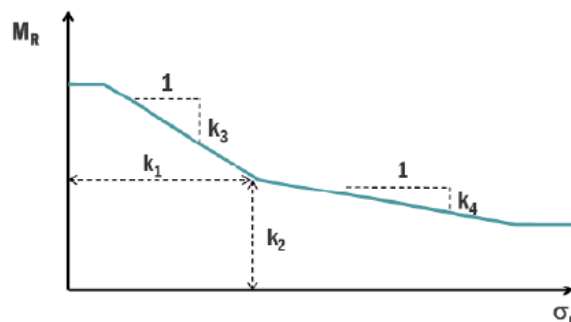


Figura 24. M_r vs σ_d para suelos finos (Fuente: Módulo I Espec. Pavimentos. 2010. Ing. Fabián Elizondo. Lanamme UCR).

Correlaciones o relaciones empíricas para obtención de “ M_r ”

Otra forma de obtener el módulo de resiliencia para los suelos y materiales que forman parte de la estructura de pavimentos es mediante la utilización de correlaciones o relaciones empíricas con otras propiedades de mayor facilidad de obtención. Esto es muy útil principalmente en el ámbito de los caminos vecinales ya que generalmente estos proyectos cuentan con pocos recursos para realizar ensayos triaxiales o resulta más rápido y práctico a la hora de realizar un diseño aplicar un ensayo como el “DCP” y posteriormente correlacionar con el CBR y el Módulo de resiliencia.

“Se pueden generar las relaciones empíricas en correlación a parámetros como CBR, K, mediciones de deflexiones, propagación de ondas o usando deflectómetro de impacto (FWD)”²⁰.

Las correlaciones deben tener un manejo cuidadoso, pues son aproximadas y se basan en un número limitado de datos.

A continuación se presenta un cuadro de resumen con varias correlaciones conocidas y que usualmente utilizan diversos autores:

²⁰ Fuente: “CEJA. Colombia. 2005. Fredy Alberto Reyes Lizcano”

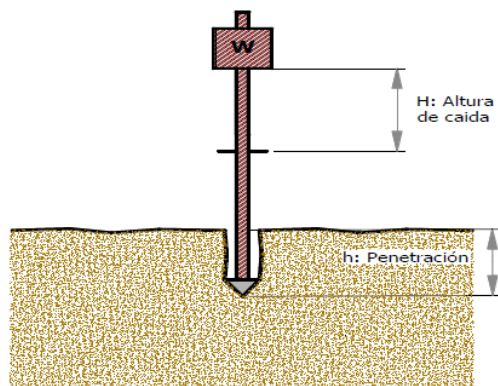
Expresión matemática del modelo (M_r en MPa)	Referencia
$M_r = 10 \cdot \text{CBR}$	Método de diseño Shell Heukelom y Foster (1960)
$M_r = 38 \cdot \text{CBR}^{0.711}$	Cuerpo de Ingenieros de Los Estados Unidos Green y Hall (1975)
$M_r = 18 \cdot \text{CBR}^{0.44}$	TRRL Lister (1987)
$M_r = 21 \cdot \text{CBR}^{0.45}$	Consejo de Suráfrica Ayres (1997)
$M_r = 8 \cdot \text{CBR}$	Guía de Diseño AASHTO 93 con $5.25 < B < 21$; $B = 10.5$ para $\text{CBR} < 10$
$M_r = 6.5 \cdot \text{CBR}^{0.455}$	Colombia Suelos de Bogotá

Figura 25. Relaciones empíricas usualmente utilizadas (Fuente: Materiales, construcción y diseño. Fredy Alberto Reyes Lizcano).

Penetrómetro dinámico de cono (DCP)

Es un equipo que mide indirectamente la resistencia al corte de un material en correlación con la resistencia a la penetración dinámica a través de las distintas capas de un pavimento o de los diferentes estratos de una sub-rasante, cuantificando la capacidad estructural in situ.

Consiste en una sonda de acero con un extremo inferior en forma de cono, que se penetra a través de los suelos, bajo la acción de una masa que cae libremente desde una altura especificada. Se registra la penetración y el número de golpes necesarios para cada penetración y se obtiene un perfil estructural de las capas atravesadas. El siguiente esquema ilustra este tipo de dispositivo:



Los tipos de suelos adecuados para su uso son suelos finos y las arenas. No se debe usar en materiales cementados.

Usos del DCP

- Se puede usar para facilitar la exploración geotécnica en forma económica.
- Para cuantificar los probables espesores de capas existentes o de estratos de suelos.
- Sirve para obtener una idea de la resistencia o capacidad estructural de un determinado material.
- Se puede utilizar para controlar la uniformidad en un proceso de compactación.
- Obtener otros parámetros de comportamiento de los materiales, mediante correlaciones.

Razón de Poisson

Es la relación entre las deformaciones transversales y longitudinales de un espécimen sometido a carga. Los materiales más rígidos presentan menores relaciones de Poisson.

Material	Rango	Típico
Concreto hidráulico	0,10-0,20	0.15
Concreto asfáltico	0,15-0,45	0.35
Base tratada con asfalto	0,15-0,45	0.35
Base tratada con cemento		
Suelo granular	0,10-0,20	0.15
Suelo fino	0,15-0,35	0.25
Concreto pobre	0,10-0,20	0.15
Base y subbase granular	0,30-0,40	0.35
Suelo de subrasante	0,30-0,50	0.40

Figura 26. Valores típicos de la razón de Poisson (Fuente: Materiales, construcción y diseño. Fredy Alberto Reyes Lizcano).

Módulo resiliente efectivo

Las características de resistencia de los suelos varían según su estado de humedad debido a que hay cambios estacionales del módulo resiliente y CBR de los suelos.

El propósito de identificar los módulos estacionales es cuantificar el daño relativo que el pavimento experimenta durante cada estación en cada año. Entonces se usa un módulo efectivo de subrasante para el diseño del pavimento (ver figura 27).

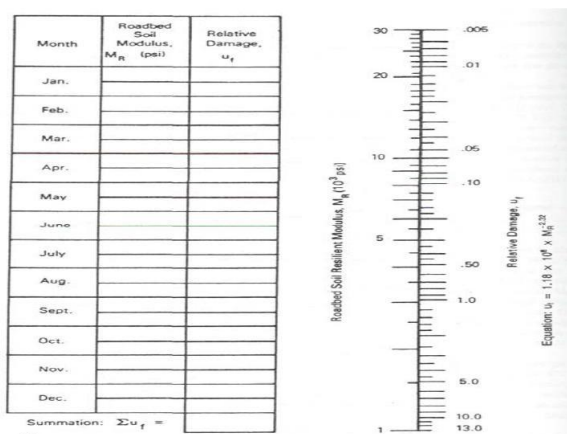


Figura 27. Nomograma para estimación de daño relativo "uf" (Fuente: Guía AASHTO 1993).

Los datos estacionales deben traducirse en un módulo resiliente efectivo de la subrasante.

El daño relativo "uf" se estima mediante la siguiente ecuación:

$$u_f = 1,18E08 * MR^{-2,32}$$

Donde:

MR', módulo de resiliencia de diseño, PSI.

Parámetro de resistencia por unidad de diseño según INA

Para la obtención del parámetro de resistencia de unidad homogénea de diseño, ya sea CBR, Modulo resiliente, Modulo de Reacción, etc., con la información que se recolectó en los apiques que se realizaron a lo largo de la unidad, se procede de la siguiente manera:

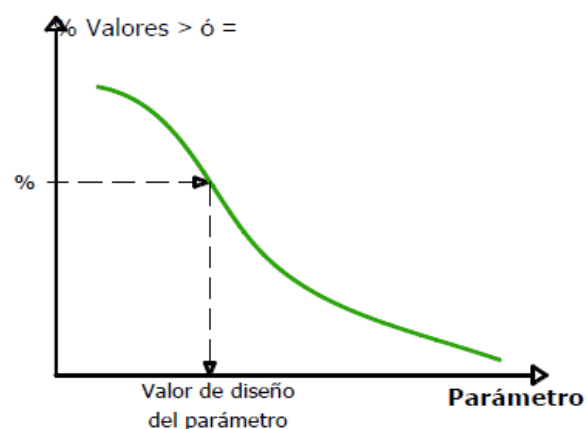
Se determina el nivel de tránsito de diseño y de acuerdo a este valor se determina el percentil para hallar la resistencia de diseño. En la siguiente tabla se presentan los límites para la selección de la resistencia propuesto por el Instituto del Asfalto:

CLASE DE TRANSITO	Nivel de Transito (N)	Valor de diseño (%)
Liviano	10 ⁴ o menos	60 %
Mediano	10 ⁴ - 10 ⁵	75 %
Pesado	Mayor a 10 ⁵	87.5 %

Figura 28. Límites para la selección del percentil de diseño (Fuente: Instituto del asfalto).

Posteriormente se deben ordenar de menor a mayor todos los valores del parámetro obtenidos para los apiques de la unidad, se deben tener en cuenta las repeticiones. Para cada valor se determina el número de valores mayores o iguales a ese valor del parámetro y se saca el porcentaje.

Se elabora una gráfica de valores del parámetro en las abscisas, contra el porcentaje de valores mayores o iguales del parámetro en las ordenadas, los dos ejes en escala aritmética.



En función del nivel del tránsito se obtiene el valor del parámetro para diseño. Para este procedimiento se requiere mínimo 10 datos para tener representatividad estadística alguna. En situaciones donde se tengan menor cantidad de datos se debe tomar el menor valor del parámetro para diseño.

Materiales

Entre los principales materiales a utilizar para el diseño y construcción de las estructuras de pavimentos que se presentan en este proyecto y que corresponden a los que más se utilizan en los caminos vecinales del país se cuentan con los siguientes:

- Materiales granulares (bases y subbases)
- Materiales estabilizados con cemento Portland
- Concreto asfáltico (Mezcla asfáltica)
- Concreto hidráulico
- Tratamientos o riegos superficiales
- Adoquines de concreto

Materiales granulares

Son las capas intermedias de las estructuras de los pavimentos, las cuales se colocan entre la capa de rodadura y la sub-rasante, se construyen con agregados que se mezclan con finos, agregados que se mezclan con ligantes y/o estabilizados (cemento, asfalto, cal, etc.).

El principal parámetro estructural de las capas de base y de sub-base es el Módulo de Resiliencia.

Entre las principales funciones de estas capas se presentan las siguientes:

- Aumentar la resistencia estructural, principalmente la base. La sub-base contribuye con el espesor, alejando la sub-rasante y disipando esfuerzos.
- Función drenante (la base tiene menor cantidad de finos).
- Evitar o disminuir el bombeo, función de la sub-base en los pavimentos rígidos.
- La sub-base absorbe los cambios volumétricos del material de sub-rasante.
- La base sirve como capa de rodadura provisional, mientras se construye la carpeta asfáltica.
- La sub-base al ser un material no triturado, contribuye en economía a la estructura.

Materiales estabilizados

La estabilización de suelos en la construcción de carreteras puede definirse como un “proceso para el mejoramiento de la resistencia del suelo mediante la reducción de su susceptibilidad a la influencia del agua y condiciones del tránsito en un periodo de tiempo razonable”²¹. Los materiales disponibles para carreteras pueden procesarse mediante estabilización y entonces se pueden utilizar en la construcción de caminos de bajos costos. En la actualidad el uso principal de una mezcla de suelos estabilizados es en la construcción de la capa base de la estructura de pavimento.

Una base de suelo estabilizado puede proporcionar el soporte para una superficie de rodamiento relativamente delgada, la cual estará sujeta a un ligero o moderado volumen de tránsito o como base para un pavimento el cual estará sujeto a altos volúmenes de tránsito.

Igualmente, la estabilización se puede utilizar para el mejoramiento de subrasantes. El tipo y grado de estabilización requerida en cualquier caso es principalmente un problema de disponibilidad y costo de los materiales utilizados, así como su compatibilidad con las condiciones del suelo existente. El tránsito anticipado y las condiciones climáticas son también de gran importancia en la selección del método de estabilización apropiado.

Cemento Portland como material estabilizador

La estabilización con cemento Portland se puede usar en una gran variedad de suelos, como: gravas, arenas, limos y suelos de baja plasticidad, “sin embargo, el cemento no es tan efectivo como la cal en la estabilización de arcillas de alta plasticidad”²². Algunos suelos arcillosos tienen una alta afinidad con el agua, de manera que el cemento no puede hidratarse lo necesario para producir la reacción puzolánica completa. Usualmente es ventajoso utilizar cemento cuando los suelos no reaccionan con la cal.

²¹ Fuente: “Estabilización de Suelos. Fernando Sánchez Sabogal. Colombia”

²² Fuente: “Mitchell y Raad, 1973”

Similar a la cal, el cemento ayuda a disminuir el límite líquido y a incrementar el índice plástico y la manejabilidad de los suelos arcillosos. Para suelos arcillosos, la estabilización con cemento es efectiva cuando el límite líquido es menor que 45 – 50 y el índice plástico es menor que aproximadamente 25. En la figura 29 se presentan los requisitos óptimos del cemento por volumen para la estabilización efectiva de varios tipos de suelos:

TIPO DE SUELO		Porcentaje de cemento por volumen
Clasificación AASHTO	Clasificación unificada	
A-2 y A-3	GP, SP y SW	6 – 10
A-4 y A-5	CL, ML y MH	8 – 12
A-6 y A-7	CL, CH	10 – 14

Figura 29. Cemento requerido por volumen para la estabilización efectiva de varios suelos (Fuente: Mitchell y Freitag, 1959).

Al igual que la cal, el cemento ayuda a incrementar la resistencia de los suelos y la resistencia decrece con el tiempo de curado. Los suelos granulares y arcillosos de baja plasticidad son obviamente los más adecuados para la estabilización con cemento. Las arcillas cálcicas se estabilizan más fácilmente por la adición de cemento, mientras que las arcillas sódicas e hidrogenadas, de naturaleza expansiva, responden mejor a la estabilización con cal. Por estas razones debe ponerse atención a la selección del material estabilizador.

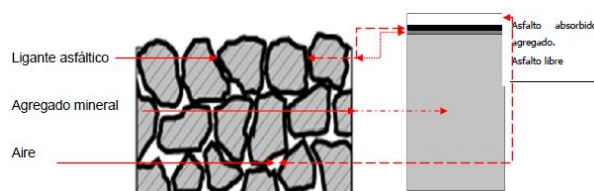
La alta resistencia a la compresión desarrollada en suelos de subrasantes y bases estabilizados con cemento genera altos valores de rigideces o módulos de resiliencia en las capas resultantes del pavimento. En muchos casos, las resistencias son tan altas y las rigideces tan grandes que la capa que se trata con cemento debe considerarse como una losa estructural. Esta resistencia ganada, la cual ocurre bastante rápido, puede resultar en una contracción considerable, la cual debe acomodarse por técnicas apropiadas de construcción.

Concreto asfáltico (mezcla asfáltica)

Mezcla de ligante asfáltico y agregado mineral gradado que se mezcla a una temperatura elevada y compactada para formar una capa

relativamente densa de pavimento. ($\approx 5\%$ ligante y $\approx 95\%$ agregado).

La siguiente imagen muestra la distribución de los componentes:



En lo que respecta al desempeño de las mezclas asfálticas en caliente se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Estructural:** Se define como la habilidad del pavimento de soportar tráfico sin desarrollar daños apreciables.
- **Funcional:** Es la habilidad del pavimento de brindar una superficie uniforme y segura para el confort y la conveniencia del público.

Módulo dinámico de la carpeta asfáltica

Corresponde al parámetro estructural principal para el diseño del espesor de la carpeta, su valor se debe corregir ya que el mismo se afecta por la velocidad de carga y la temperatura media anual de la región del proyecto (T_{wmaat}). La determinación del Módulo dinámico de la carpeta asfáltica puede realizarse con:

- Ensayos dinámicos
- Metodología Shell
- Módulo resiliente a la tensión indirecta

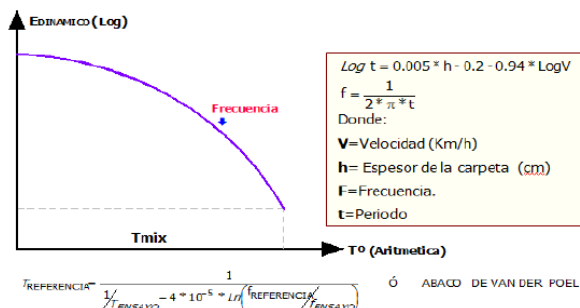
Ensayos dinámicos

Ensayo Marshall: El diseño de mezcla debe contener lo siguiente:

- % C.A en Peso
- % C.A en Volumen
- Volumen de Agregados
- Volumen de Asfalto
- Volumen de Vacíos
- Densidad Marshall

Posteriormente se deben elaborar de 4 a 5 briquetas idénticas, con las características óptimas del Diseño Marshall.

En el ensayo dinámico se realiza una combinación de temperaturas dependiendo de la zona del proyecto y frecuencias, dada por la velocidad de los vehículos. Como resultado se obtienen las curvas maestras que representan la variación del módulo dinámico en función de la temperatura, para una frecuencia dada. La siguiente gráfica representa un ejemplo:



Metodología Shell para el cálculo del módulo dinámico

Para esta metodología se debe realizar el siguiente procedimiento:

- Envejecer el cemento asfáltico en un ensayo de película delgada
- Determinar el T800 o punto de ablandamiento, y el índice de penetración
- Determinar la Temperatura de trabajo de la mezcla, $f(TWMAAT; H \text{ Carpeta})$
- Determinar el módulo del cemento asfáltico

Concreto hidráulico

El concreto se puede definir como la “unión de áridos (silíceos, calizos, graníticos, etc.), un material aglutinador o pasta (cementante, aire, agua), y aditivos (acelerantes retardantes de fraguado, reductores de agua o plastificadores, superplastificadores, mejoradores de adherencias, incorporadores de aire, entre otros)”²³.

²³ Fuente: “Mantallana. 2006”

Por lo general el agregado conforma entre 65-75 % del volumen del concreto y la pasta entre el 25-30 % (cemento entre el 8-16 %, agua entre el 17-19 % y aire entre el 1-2 %).

En términos estructurales, la resistencia a los siete días del concreto es de aproximadamente 65-75 % de la resistencia de diseño a los 28 días. El factor más importante que incide en la resistencia del concreto es la relación agua-cemento en peso. Entre mayor sea la relación agua-cemento, menor será la resistencia del concreto. Otros factores que afectan la resistencia son: la forma, tipo, contenido, textura superficial, tamaño máximo y resistencia del agregado pétreo, tipo y calidad del cemento, cantidad y tipos de aditivos, la calidad del agua y la temperatura ambiental (la ganancia de resistencia tiende a ser más rápida en climas de alta temperatura).

En pavimentos rígidos, el parámetro principal de resistencia con el cual se caracteriza el concreto es el módulo de ruptura (MR). Este parámetro se obtiene mediante el ensayo de viga en flexión del concreto y como mínimo se recomienda para el diseño de losas un valor de 42 Kg/cm².

Tratamientos superficiales

Son sellos compuestos de combinaciones de riego de un ligante asfáltico seguido capas de agregados de diversas granulometrías y tamaños tan uniforme como sea posible. El espesor del tratamiento es casi igual al del tamaño máximo nominal del agregado. El triple en general tiene un espesor de hasta 2,5 cm. Se utilizan principalmente como una solución para vías de bajo volumen de tránsito y para proveer una superficie impermeable, resistente al deslizamiento, sobre una estructura de pavimento existente (agrietada o envejecida). Está compuesto básicamente por:

- Emulsión asfáltica
- Agregados

Emulsiones asfálticas

Es una mezcla compuesta de dos líquidos inmiscibles, donde uno de ellos (fase dispersa) se dispersa en el otro (fase continua) en forma de

gotas diminutas. En el caso de la emulsión asfáltica, el cemento asfáltico corresponde a la fase dispersa y el agua a la fase continua que contiene una pequeña cantidad de agente emulsionante.

El emulsionante se encarga de ligar ambas fases, por lo que sus moléculas deben tener un extremo polar hidrofílico y otro no polar que se una al asfalto. Pueden clasificarse según su estabilidad o según el emulsionante que se utilice.

Según su estabilidad:

- De rompimiento rápido (RS: Rapid-Setting)
- De rompimiento medio (MS: Medium-Setting)
- De rompimiento lento (SS: Slow-Setting)
- Para impregnación
- Súper estables

Según el emulsionante:

- Emulsiones aniónicas
- Emulsiones catiónicas

Según su estabilidad así es su aplicación ingenieril. A continuación recomendaciones de su uso:

ROMPIMIENTO	RAPIDO	MEDIO	LENTO
Tratamientos superficiales	X		
Reciclado in situ en frío		X	
Riego de Llga			X
Sellos de lechada asfáltica			X
Mezclas frías densas			X

Las emulsiones aniónicas (carga negativa en las partículas asfálticas) se comportan mejor con los agregados que tienen en su mayor parte cargas positivas en su superficie (calizas y dolomitas).

Las emulsiones catiónicas (carga positiva) se comportan mejor con agregados en su mayor parte con carga negativa en su superficie (agregados pétreos: granito, sílices).

Adoquines de concreto

Son elementos individuales, que al colocarse en un patrón definido sobre una base y una subbase

compactadas constituyen un pavimento flexible con grandes ventajas constructivas, valor estético y de gran durabilidad.

La propiedad de distribuir las cargas de pavimentos de concreto depende esencialmente de los espesores de base, subbase, arena y adoquín, así como de la capacidad portante de la subrasante. El adoquín distribuye las cargas con base en su forma, espesor, la resistencia mecánica y el patrón de colocación.

El diseño de pavimentos de adoquines se basa en las metodologías de diseño de pavimentos flexibles o articulados y se puede diseñar de dos formas:

- Diseño mediante AASHTO 1993
- Diseño mediante la metodología BSI / ICPC

Para el caso del presente proyecto se aplicó el diseño de las estructuras de pavimento de adoquines mediante AASHTO 1993. Las recomendaciones norteamericanas proponen que se emplee siempre una capa de rodadura de adoquines de 80 mm de espesor más una cama de arena de 25 mm antes de compactar. Esta capa de 105 mm de espesor se caracteriza por un coeficiente estructural $a_1=0,44$. Al definirse estas características de la primera capa, el diseño se ejecuta según la ecuación de diseño de AASHTO 1993 hasta para un periodo de diseño de 20 años. A continuación un ejemplo ilustrativo:

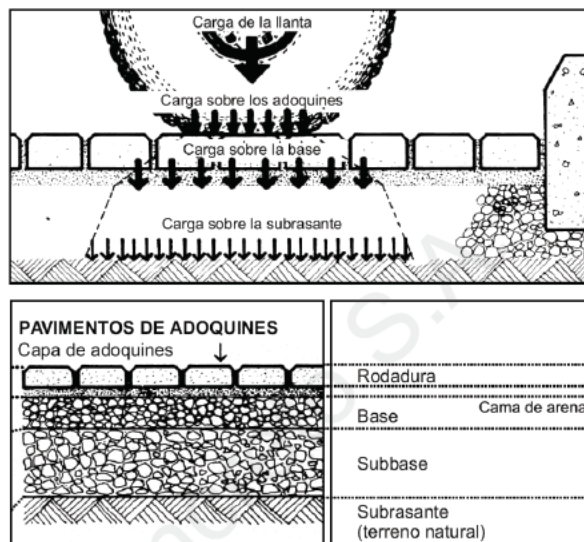


Figura 30. Detalle de diseño de pavimento de adoquines (Fuente: Manual técnico adoquines de concreto. Productos de concreto "PC").

Inventario de tránsito

Entre los aspectos más relevantes a tomar en cuenta para el estudio de la variable tránsito, se pueden considerar: el volumen de tránsito, conteos TPD y TPDA, efecto de las cosechas, vehículos a considerar para diseño geométrico y para diseño de pavimentos, además de los siguientes parámetros:

Clasificación vehicular

La clasificación oficial que maneja la Dirección de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT) consiste en lo siguiente:

- **Liviano:** Automóviles para personas, jeeps, vans.
- **Buses:** Todos los buses que tienen doble llanta en la parte de atrás (hay buses sin doble llanta, se tienen que tomar en cuenta por separado).
- **Carga liviana:** Pick-ups, carros acondicionados para cargas pequeñas. Se refiere a la clasificación usada, no necesariamente a vehículos que tienen la placa carga liviana.
- **2 ejes:** Incluye todos los camiones con dos ejes, doble llanta en la parte de atrás.
- **3 ejes:** Incluye todos los camiones con tres ejes, dos ejes de doble llanta en la parte de atrás.
- **5 ejes:** Incluye tractocamiones (furgones), dos parejas de dos ejes con doble llanta.

Reglamento

En el diario oficial de Costa Rica La Gaceta No.15 del miércoles 19 de enero del 2005, se modificó el Reglamento de Circulación por Carretera con base en el peso y las dimensiones de los vehículos de carga. A continuación (ver figura 31) se presenta un resumen de la información más importante:

Descripción de eje	Peso máximo en toneladas	Tolerancia báscula en toneladas
Eje simple delantero	6,0	0,5
Eje simple trasero	6,0	0,5
Eje simple dual	10,0	0,5
Eje doble, llanta simple	13,0	0,5
Eje doble, llantas mixtas	15,0	0,5
Eje doble, tandem	16,5	0,5
Eje triple, llantas simples	16,5	0,5
Eje triple, 2D, 1S	20,0	0,5
Eje triple, tridem	23,0	0,5

Figura 31. Pesos máximos permitidos en ejes de tránsito según la legislación vigente (Fuente: La gaceta, 19 de enero, 2005).

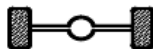
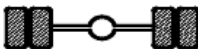
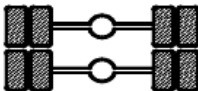
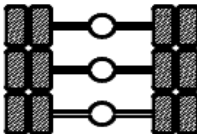
Tipos de ejes

Los siguientes corresponden a los tipos de ejes:

Simple: Eje en cuyos extremos lleva una o dos ruedas sencillas.

Tándem: Compuesto por dos ejes sencillos con rueda doble en los extremos.

Tridem: Constituido por tres ejes sencillos con rueda doble en los extremos.

DESCRIPCIÓN	CONFIGURACIÓN	PESO MAXIMO
EJE SIMPLE DIRECCIONAL		6.0 Ton
EJE SIMPLE RUEDA DOBLE		11.0 Ton
EJE TANDEM RUEDA DOBLE		22.0 Ton
EJE TRIDEM RUEDA DOBLE		24.0 Ton

Presión de inflado y área de contacto de las llantas

Los neumáticos de los vehículos se apoyan sobre la calzada de manera distinta y forman una huella la cual depende del tipo de llanta, la presión de inflado y la carga por rueda del vehículo. Si el vehículo está en movimiento, además de la carga

vertical, actúan fuerzas tangenciales debido al rozamiento y cambios de trayectoria, succiones y efectos verticales de impacto.

Para la determinación del área de contacto se supone como hipótesis las siguientes premisas:

- Las presiones de contacto no afectan ni controlan el espesor necesario del pavimento, pero influyen en la calidad que deben tener las capas superiores de la estructura.
- Se asume como el esfuerzo que transmiten las ruedas, la presión de inflado de las llantas, la cual varía para vehículos pesados entre 5.6 Kg/cm² (80 PSI) a 7.0 Kg/cm² (100 PSI), el radio de carga generalmente oscila entre 10 cm y 15 cm.

La siguiente es la ecuación que determina el área de contacto de las llantas:

$$A_{\text{contacto}} = \frac{\text{Carga de llanta}}{\text{Presión de inflado}}$$

Factor daño por tipo de vehículo

Representan el mayor o menor daño o pérdida de serviciabilidad que causa un vehículo comercial a un pavimento, respecto al eje normalizado de 8.2 Ton. Significa el número de veces que pasa el eje normalizado de 8.2 Ton, por cada paso del tipo de vehículo considerado. La siguiente corresponde a la ecuación para el cálculo del factor daño:

$$FD_i = \left(\frac{P}{Q}\right)^N$$

Además:

$$FD_c = \sum FD_i$$

Donde:

FD_i, factor daño del eje del vehículo.

FD_c, factor daño o factor camión.

P, Carga real del eje, ton.

Q, Carga del eje patrón, ton.

N: 4.

Distribución direccional

Generalmente se asume 50 % en cada dirección. Sin embargo, en algunos casos la distribución de camiones pesados se da en un solo sentido y en el otro sentido los camiones regresan descargados. El diseño de una estructura de pavimento puede ser diferente para cada uno de los sentidos cuando las calzadas son independientes.

Número de carriles en ambas direcciones	LD ¹⁰
2	50
4	45
6 o más	40

Figura 32. Factor de distribución por dirección (Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos. AASHTO 1993).

Distribución por carril

Toma trascendencia en el caso de vías de más de dos carriles. Se deben realizar consideraciones en este aspecto para cada caso en particular, donde los niveles de tránsito son de tal magnitud que exigen calzadas multicarriles, como es el caso de los accesos a las ciudades importantes.

Número de carriles en una sola dirección	LC ¹¹
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4	0.50 – 0.75

Figura 33. Factor de distribución por carril (Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos. AASHTO 1993).

Ejes equivalentes de diseño

Para el cálculo de los ejes equivalentes de diseño de 8,2 toneladas se procede a utilizar la siguiente ecuación establecida por el Instituto del Asfalto:

$$N = N_0 * FD * FC * 365 * \frac{(1 + i)^n - 1}{i}$$

Donde:

N, número de ejes equivalentes para el periodo de diseño por carril de diseño.

NO, numero de ejes equivalentes que circulan por el carril de diseño, en el año base.

FD, factor direccional.

FC, factor carril.

i, tasa de crecimiento vehicular, %.

n: periodo de diseño, años.

Generalmente, los valores de los tránsitos acumulados para diseño de una vía se dan en millones de ejes equivalentes, con un decimal de precisión.

Al tránsito calculado de diseño, se le debe sumar el tránsito atraído, el tránsito generado, el tránsito de desarrollo, etc.

Diseño pavimentos

Para efectos de diseño de pavimentos se analizará el método de la AASHTO 1993 para pavimentos flexibles y pavimentos rígidos. El comportamiento de los mismos al aplicarles cargas es muy diferente. En un pavimento rígido

debido a la consistencia de la superficie de rodadura, se produce una buena distribución de las cargas, lo que da como resultado tensiones muy bajas en la superficie.

Lo contrario sucede en un pavimento flexible, la superficie de rodadura al tener menos rigidez se deforma más y se producen mayores tensiones en la subrasante. A continuación se presentan los principales conceptos que se relacionan con el diseño de pavimentos flexibles y rígidos mediante el método de AASHTO 1993:

Pavimento flexible

De acuerdo con la norma SIECA (2002) el concepto básico para el diseño de carreteras es determinar los espesores de las capas estructurales, basado tanto en el volumen de tránsito como en las propiedades de los materiales. La metodología de diseño GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, AASHTO 1993, estipula los requerimientos para realizar un diseño de caminos. Este es un método de tipo empírico e iterativo. A continuación la fórmula empírica que se utiliza para efectos de realizar el diseño matemáticamente:

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta PSI}{0.40 + \frac{4.2 - 1.5}{1094 (SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log M_R - 8.07$$

En donde:

W_{18} = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculadas conforme el tránsito vehicular.

Z_R = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.

S_o = Desviación estándar de todas las variables.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.

M_R = Módulo de resiliencia de la subrasante.

SN = Número Estructural

Figura 34. Fórmula de la norma AASHTO para diseño de pavimento flexible (Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos. AASHTO 1993).

Dentro de las principales variables a tomar en cuenta en este método se tienen las siguientes:

Periodo de diseño

Es el “número de años para el cual se proyecta el diseño del pavimento en función de la proyección del tránsito y el tiempo que se considere apropiado para que las condiciones del entorno se comiencen a alterar desproporcionadamente”²⁴.

La vida útil del pavimento es aquel tiempo que transcurre entre la construcción del mismo y el momento en que alcanza el mínimo de serviciabilidad.

El periodo de diseño puede llegar a ser igual a la vida útil de un pavimento. En los casos en que se consideren reconstrucciones o rehabilitaciones a lo largo del tiempo, el periodo de diseño comprende varios periodos de vida útil que son: el del pavimento original más las rehabilitaciones o reinversiones.

Tipo de Carretera	Periodo de Diseño
Autopista Regional	20 – 40 años
Troncales suburbanas	15 – 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 – 20 años
Colectoras Rurales	

Figura 35. Periodos de diseño para las carreteras regionales (Fuente: Manual Centroamericano para el diseño geométrico de las carreteras regionales. SIECA, 2001).

Nivel de confianza “R”

Nivel de confianza es la probabilidad de que el desempeño del diseño de pavimento se desarrollará de manera satisfactoria debido a las cargas de tránsito y a las condiciones climáticas durante el periodo de diseño. El pavimento se desempeñará según se diseñó dada la variabilidad de construcción, clima y materiales. Se utilizan métodos estadísticos para determinar cuánto es la desviación de la curva de desempeño PSI actual (Performance curve) y de la curva de desempeño PSI de diseño (Design Curve).

²⁴ Fuente: “Manual Centroamericano para el diseño geométrico de las carreteras regionales. SIECA, 2001”

La diferencia entre la curva PSI de diseño y la curva PSI de desempeño es el error presente en la calidad de los datos de entrada en el diseño y el error presente en las ecuaciones.

El nivel de confianza está compuesto por dos variables:

- Desviación estándar normal (ZR).
- Desviación estándar debido al error de proyecciones de tránsito y al desempeño del pavimento (So).

En el caso de las desviaciones estándar debido al error de proyecciones de tránsito y al desempeño del pavimento (So), se recomienda utilizar los valores comprendidos dentro de los siguientes intervalos:

- Para pavimentos flexibles: 0.40-0.50
- Para pavimentos rígidos: 0.35-0.40
- Para sobre capas: 0.50

Serviciabilidad “ΔPSI”

Grado de confort que tiene la superficie para el desplazamiento natural y normal de un vehículo.

Actualmente para medir este deterioro se utiliza el IRI, Índice Internacional de Rugosidad (International Roughness Index).

Los valores que se recomiendan según del tipo de pavimento son los siguientes:

Índice de serviciabilidad inicial:

Po= 4.5 para pavimentos rígidos

Po= 4.2 para pavimentos flexibles

Índice de serviciabilidad final:

Pt= 2.5 o más para caminos muy importantes

Pt= 2.0 para caminos de tránsito menor

Número estructural “SN”

Es un número abstracto que representa la resistencia total de la estructura del pavimento y es igual a la sumatoria del producto de los espesores de cada capa (Hi) por su coeficiente estructural (ai) y por el coeficiente de drenaje (mi).

La siguiente figura corresponde al nomograma para la obtención de los números estructurales:

Diseño de Número Estructural

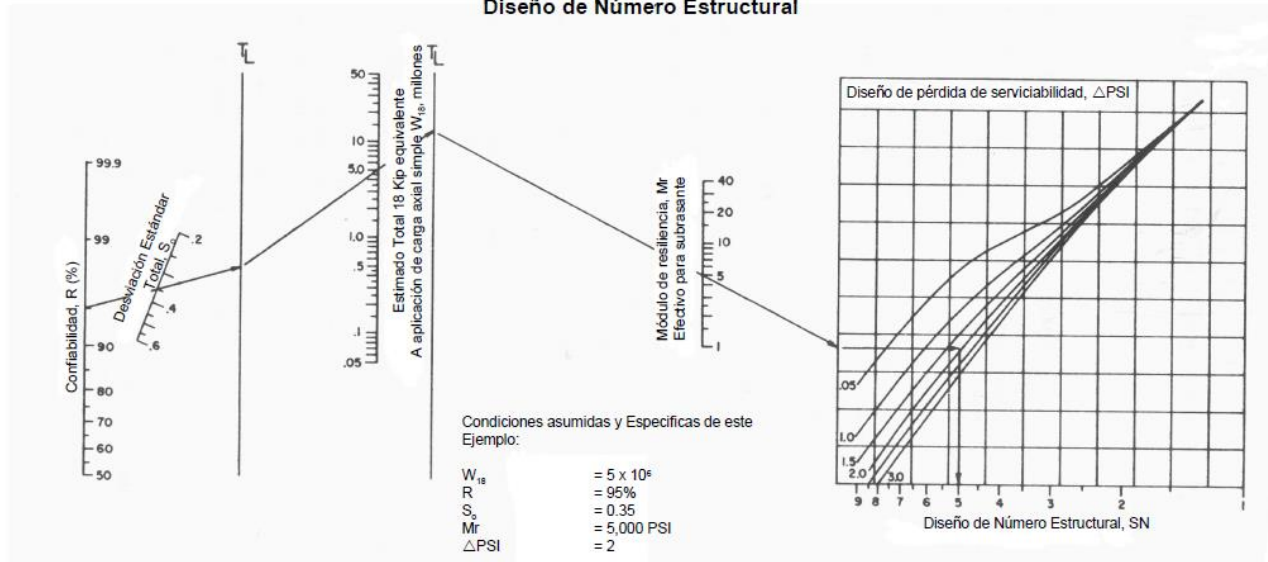


Figura 36. Nomograma de la norma AASHTO para la obtención de números estructurales (Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos. AASHTO 1993).

Coeficientes estructurales “ai”

El número estructural se convierte a una combinación de espesores de capa al combinar coeficientes que representan la capacidad estructural relativa del material de cada capa.

Estos valores están en función del módulo resiliente de las capas granulares y estabilizadas y del módulo dinámico en la carpeta asfáltica, se pueden obtener a partir de diversos nomogramas de la AASHTO.

Coeficientes de drenaje “mi”

Los coeficientes de drenaje son valores menores, iguales o mayores a la unidad, esto depende de la cantidad percolante de las capas de drenaje. Al tener capas de drenaje con valores mayores que la unidad, entonces es factible la posibilidad de diseñar paquetes estructurales con espesores menores. En el caso que el drenaje no sea bueno el coeficiente es menor que la unidad lo que obligará a diseñar un paquete estructural con mayor espesor, que permita resistir en igualdad de condiciones el tránsito para el que se diseñó, un mayor espesor de paquete estructural no garantizará el tener un buen

drenaje. A continuación se presentan los valores para la escogencia de los coeficientes de drenaje:

Calidad del Drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos del 1%	1% - 5%	5% - 25%	más del 25%
Excelente	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Mediano	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Malo	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy malo	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Figura 37. Valores del coeficiente de drenaje (Fuente: Manual Centroamericano para el diseño geométrico de las carreteras regionales. SIECA, 2001).

Diseño de espesores “Di”

La siguiente es la ecuación que relaciona los números estructurales con los espesores de capa, los coeficientes estructurales y coeficientes de drenaje:

$$S_n = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Donde:

a_1 , a_2 , a_3 , son los coeficientes estructurales o de capa, de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente.

m2, m3, son los coeficientes de drenaje para base y subbase.

D1, D2, D3, son los espesores de capa de la superficie de rodadura, base y subbase, en pulgadas.

Una vez que se introducen los valores se precede a despejar los espesores de las capas, dichos valores se obtienen en pulgadas y se deben pasar al sistema métrico decimal y hacer los redondeos correspondientes y recalcular nuevamente los números estructurales.

Pavimento rígido

$$\log W_{18} = Z_r * S_o + 7.35 * \log(D + 25.4) - 0.06 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 * 10^7}{(D + 25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 Pt) * \log \left[\frac{S_c * C_d [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 * J \left[D^{0.75} - \frac{18.12}{\left(\frac{E_c}{K} \right)^{0.25}} \right]} \right]$$

Figura 38. Fórmula de la norma AASHTO para diseño de pavimento rígido (Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos. AASHTO 1993).

Las siguientes corresponden a las variables requeridas para este diseño:

- Tránsito: Ejes Equivalentes de 8.2 Ton
- Serviciabilidad: ΔPSI , PO, Pt
- Espesor de la losa: Variable a Determinar
- Confiabilidad: R, Zr, So
- Transferencia de carga: J
- Propiedades del concreto: Módulo de ruptura "Mr", módulo de elasticidad del concreto "E", razón de poisson " μ "
- Resistencia de la subrasante: Kconjunto
- Condiciones de drenaje (Cd)

Para la determinación de las variables de tránsito, serviciabilidad, confiabilidad y coeficientes de drenaje se manejan igual que para el pavimento flexible. A continuación una explicación de las que se aplican para pavimento rígido:

Propiedades del concreto

El Método AASHTO busca dimensionar los espesores de la estructura de un Pavimento de Concreto Hidráulico, de forma que sea capaz de soportar el tránsito proyectado en ejes equivalentes de 8.2 Toneladas, en el periodo de diseño estimado. Se buscará que, una vez que la estructura llegue a su vida útil, el grado de deterioro en ese momento sea superior al valor que en un inicio del diseño se le hubiera dado a la calificación del Índice de Serviciabilidad final, para un manejo seguro y confortable por parte del usuario de la vía. A continuación la ecuación que permite determinar el espesor de la losa:

Para el diseño de losas de concreto para pavimentos rígidos, las propiedades más importantes son las siguientes:

- Módulo de elasticidad: $E_c = 280000 \text{ Kg/cm}^2$
- Módulo de ruptura: $M_r > 42 \text{ Kg/cm}^2$
- Relación de Poisson: $\mu = 0.15$

Transferencia de carga "J"

Es un factor que se usa en pavimentos rígidos, para tener en cuenta, la capacidad del pavimento en concreto para transmitir las cargas a través de discontinuidades, es decir las Juntas. Su valor depende de:

- Tipo de pavimento: Reforzado con juntas, o con armadura continua
- Tipo de berma: De concreto hidráulico o de Concreto Asfáltico
- Dispositivos de transmisión de carga: Pasadores en pavimentos con juntas

La siguiente figura muestra los valores del coeficiente J:

Coeficiente de transmisión de cargas (J)	BERMA	FLEXIBLE		DE CONCRETO	
	Pasadores en los Pavimentos	Si	No	Si	No
Tipo de Pavimento	1. masivo o reforzado con juntas.	3.20	3.80-4.4	2.50-3.1	3.6-4.20
	2. Reforzado continuo.	2.90-3.20	--	2.30-2.9	--

Figura 39. Valores del coeficiente de transmisión de carga (Fuente: Manual Centroamericano para el diseño de pavimentos de las carreteras regionales. SIECA, 2001).

Dentro de cada intervalo de variación del coeficiente de transmisión de carga se recomienda usar valores altos en cuanto menor sea el valor del módulo de reacción del apoyo KAPOYO, en cuanto más elevado sea el coeficiente de dilatación térmica del concreto más altas serán las variaciones de temperatura de la zona del proyecto. Por el contrario, los valores bajos se utilizan en carreteras de bajo tráfico y en vías que tengan un porcentaje bajo de camiones o vehículos pesados, puesto que en estas condiciones habrá menor pérdida del efecto de la trabazón entre los agregados.

Si no existe Berma $J = 3.2$.

Resistencia de la subrasante “K”

El Módulo de Reacción compuesto de la subrasante se determina a suponer su espesor semi-infinito, su determinación está en función de: Módulo Resiliente de la Sub-rasante, Módulo Resiliente de la Sub-base, Espesor (H) de la Sub-base.

Esta determinación se puede realizar por medio de la aplicación de los ábacos desarrollados de acuerdo a las premisas desarrolladas por la AASHTO. Su unidad de medida es el PCI (PSI/pulg = Lb/pulg²/pulg). Los siguientes son los tres casos en los que se puede

calcular “K”, para cada condición se debe corregir su valor:

1. Caso: Sin subbase
2. Caso: Con subbase
3. Caso: Con estratos de roca a menos de 3 m de profundidad

Pérdida de soporte de la subrasante “LS”

La pérdida del soporte (Ls) depende del tipo de apoyo, el valor permite cuantificar la pérdida de apoyo potencial de las losas debido a la erosionabilidad de la sub-base o bien a asentamientos diferenciales de la sub-rasante. Esta interviene en forma directa a través de una reducción del Módulo de Reacción Efectivo de la superficie en la que se apoyan las losas. A continuación se presentan los valores para para determinar la pérdida de soporte LS:

Tipo de material	Pérdida de soporte (LS)
Base granular tratada con cemento (E = 1.000.000 a 2.000.000 psi)	0,0 a 1,0
Mezclas de agregado y cemento (E = 500.000 a 1.000.000 psi)	0,0 a 1,0
Base tratada con asfalto (E = 350.000 a 1.000.000 psi)	0,0 a 1,0
Mezclas estabilizadas con materiales bituminosos (E = 40.000 a 300.000 psi)	0,0 a 1,0
Limo estabilizado (E = 20.000 a 70.000 psi)	1,0 a 3,0
Material granular sin consolidar (E = 15.000 a 45.000 psi)	1,0 a 3,0
Materiales de grano fino, o naturales de la subbase (E = 3.000 a 40.000 psi)	2,0 a 3,0

Figura 40. Valores del factor de pérdida de soporte LS (Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos. AASHTO, 1993).

Diseño de espesor de losa “D”

Una vez que se obtienen todas las variables que se requieren para el diseño del espesor de la losa, se procede de acuerdo al siguiente ábaco de la AASHTO:

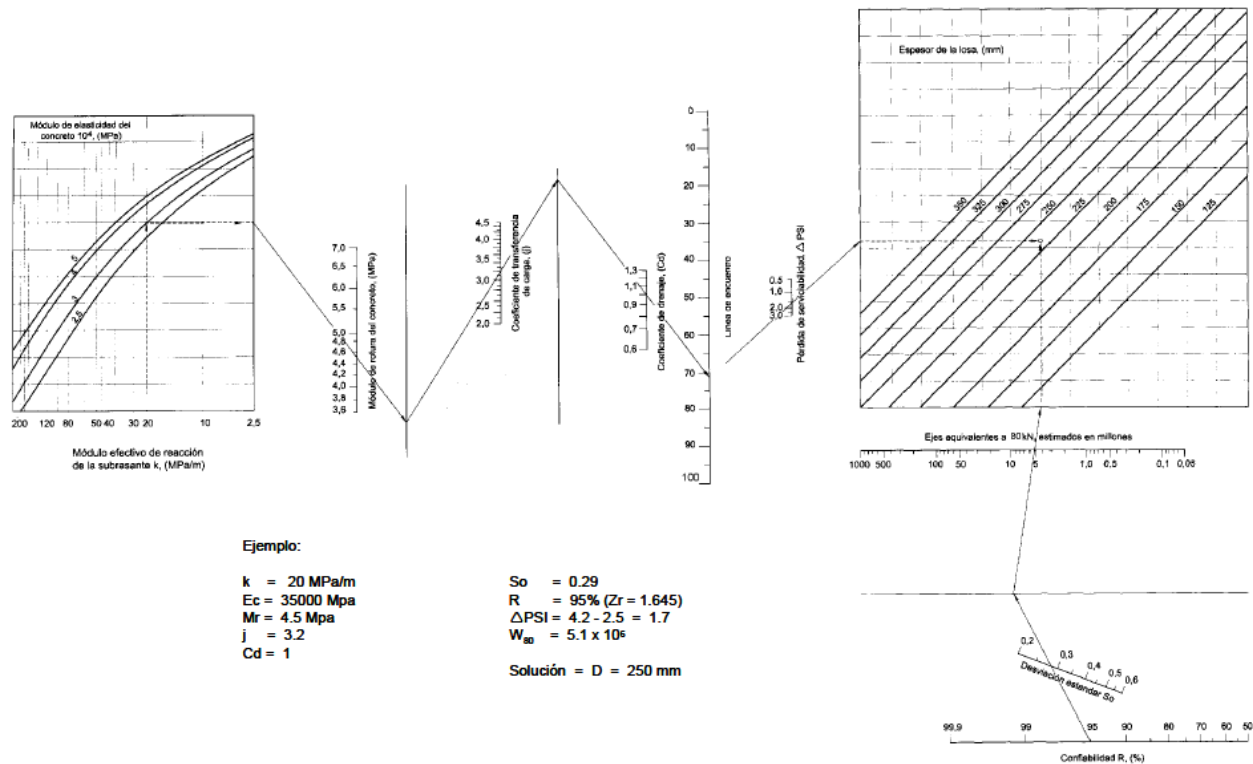


Figura 41. Nomograma de la norma AASHTO para la obtención del espesor de la losa (Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos. AASHTO 1993).

Juntas

“Tienen como objetivo principal el control de la fisuración y agrietamiento natural que sufre el concreto durante el proceso constructivo y de uso”²⁵. Además, tienen las siguientes funciones:

- Controlar el agrietamiento transversal y longitudinal.
- Divide el pavimento en secciones adecuadas para el proceso constructivo.
- Permite el movimiento y alabeo de las losas por efecto de las cargas de tránsito.
- Permite transferencia de cargas entre losas.

El sistema de juntas se diseña al tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Condiciones ambientales
- Espesor de losa
- Sistema de transferencia de carga

- Tránsito
- Características de los materiales
- Tipo de subbase
- Características del material sellante
- Diseño del hombro

Los siguientes son los tipos más comunes de juntas en losas de concreto hidráulico:

- Juntas transversales de construcción
- Juntas transversales de expansión
- Juntas transversales de contracción
- Juntas longitudinales de contracción
- Juntas longitudinales de construcción

²⁵ Fuente: “Manual Centroamericano para el diseño de pavimentos de las carreteras regionales. SIECA, 2001”

Metodología

En el presente proyecto, el objetivo fundamental es definir una guía técnica para el diseño de los principales elementos que forman parte de los caminos vecinales. El desarrollo del mismo se generó a partir de la definición de objetivos específicos, los cuales obedecen cada uno a un área estratégica de la gestión vial, entre ellas: drenajes, subdrenajes, materiales, tránsito, diseño de pavimentos flexible y rígidos y control de variables de diseño. A continuación una descripción metodológica de los procedimientos y métodos que se utilizaron para el logro de cada uno de los objetivos del proyecto:

Elementos de drenaje utilizados

Para el desarrollo del objetivo que se relaciona con la recomendación de los principales elementos del sistema de drenaje vial (Cunetas, alcantarillas, subdrenajes) se procedió a definir diferentes secciones transversales con dimensiones variables para cada una.

En el caso de las cunetas se definieron tres categorías:

1. La primera para cunetas revestidas de concreto hidráulico.
2. La segunda para cunetas de tierra o lastre.
3. La tercera para cunetas de abatimiento de nivel freático.

Para el caso de las alcantarillas se definieron tres categorías:

1. Alcantarillas circulares de concreto menores o iguales a 1,20 m de diámetro interno.
2. Alcantarillas circulares de concreto mayores a 1,20 m de diámetro interno.
3. Alcantarillas tipo “bóveda” o de cuadro de concreto.

Para el caso de los subdrenajes se definieron tres categorías:

1. Drenes longitudinales.
2. Drenes transversales.
3. Capas de drenaje o filtros tipo “francés”.

Una vez definidos estos elementos que componen el sistema de drenaje, se procedió a establecer diversas tipologías para cada categoría.

En cunetas revestidas de concreto se definieron cuatro tipologías y a su vez para cada tipología tres tamaños diferentes según la siguiente nomenclatura:

- CR1-A, CR1-B, CR1-C
- CR2-A, CR2-B, CR2-C
- CR3-A, CR3-B, CR3-C
- CR4-A, CR4-B, CR4-C

Se realizaron un total de 12 diseños de cunetas. Estas dimensiones se determinaron mediante recomendaciones hechas por el profesor asesor Eduardo Barquero Solano, consultas al manual de diseños típicos del MOPT y con base en la experiencia profesional del autor de este documento.

Para la categoría de cunetas de tierra o lastre se definió una tipología que a su vez cuenta con tres tamaños diferentes, según la siguiente nomenclatura:

CT-A, CT-B, CT-C

Para el dimensionamiento de estas cunetas se tomaron en cuenta las medidas que produce la cuchilla de una niveladora a la hora de conformar cuneta y plataforma en una calzada de lastre, así como la experiencia y criterio de este servidor.

En el caso de la tercera categoría de cunetas para la cuneta de abatimiento de nivel freático se definió una sola tipología con una sola medida, que corresponde a una cuneta con una

profundidad “h” de 70 cm, que sería la profundidad mínima por debajo de la subrasante en la cual la estructura de pavimento no puede tener agua, la siguiente sería la nomenclatura de esta tipología:

Cnf-1

Para el caso de las alcantarillas, para la categoría de $\leq 1,20$ m Ø interno se definieron todos los diámetros comerciales y se tomó como mínimo la de “0,80 m de Ø interno”²⁶ que establece la normativa actual. A continuación, la nomenclatura de cada una de ellas:

Alm-1, Alm-2, Alm-3, Alm-4.

Para el caso de las alcantarillas para la categoría de $> 1,20$ m Ø interno, se definieron todos los diámetros comerciales que hay.

Se utilizó para la determinación de los diámetros comerciales el catálogo de productos de concreto “PC”, específicamente para la sección de alcantarillas de concreto. A continuación la nomenclatura de cada una de ellas:

ALM-1, ALM-2, ALM-3, ALM-4, ALM-5, ALM-6, ALM-7, ALM-8, ALM-9.

En el caso de la categoría de alcantarillas tipo “bóveda” o de cuadro, se definieron trece tipologías, en las cuales se usaron como referencia para su dimensionamiento las unidades de medida en “pies” del sistema inglés de unidades, esto para optimizar el proceso constructivo, ya que este tipo de elementos es preferible trabajarlo con formaleta prefabricada y dado que dicha formaleta se alquila en el mercado en dimensiones nominales en pies, es preferible dimensionar estas estructuras siguiendo ese patrón de modulación y así generar ahorros en el encofrado. Además, se tomó en consideración para el dimensionamiento el manual de diseños de alcantarillas de cuadro del MOPT. A continuación, la nomenclatura de cada una de ellas:

Alc-1, Alc-2, Alc-3, Alc-4, Alc-5, Alc-6, Alc-7, Alc-8, Alc-9, Alc-10, Alc-11.

Para los elementos del sistema de subdrenajes, para cada una de las categorías se definió un detalle tipológico mínimo basado en investigación de fuentes bibliográficas y al considerar los principios de diseño de subdrenajes definidos en el marco teórico. A continuación la nomenclatura de cada una de ellas:

Drenes longitudinales: Sdl-1

Drenes transversales: Sdt-1

Capas de drenaje o filtros tipo “francés”: Fil-1

Estas tipologías así como la de la cuneta de abatimiento de nivel freático son muy importantes, ya que posteriormente en la definición de las matrices de acciones y recomendaciones de los tipos de subrasante se hará referencia a estos detalles como recomendaciones a utilizar en el caso que a la hora de evaluar la subrasante sea necesaria la incorporación de subdrenajes y/o filtros para el control de la humedad y por ende de la peligrosidad de expansión y contracción volumétrica de suelos cohesivos.

Cálculo de las propiedades geométricas de detalles tipo

Una vez que se determinan las categorías con sus respectivos detalles tipo y dimensiones de los elementos de drenajes de cunetas y alcantarillas, se procedió a calcular las propiedades geométricas de los mismos. Para el caso de este proyecto se determinaron:

- El tirante “y”, para el caso de las cunetas se utilizó el $0,9 \cdot h$ y para alcantarilla el $0,75 \cdot h$, donde “h” es el fondo total del elemento, sin embargo, la hoja de cálculo elaborada permite modificar este valor.
- El área hidráulica.
- El radio hidráulico.
- El perímetro mojado
- La relación de talud “z”, la cual es la que define la inclinación de las paredes de los elementos en el caso de las figuras triangulares y trapezoidales, para el caso práctico de este proyecto se definió como 1, pero la hoja de cálculo elaborada permite modificar este valor.

²⁶ Fuente: “Decreto ejecutivo N° 40139-MOPT”

El cálculo de estos valores se obtuvo a partir de las ecuaciones establecidas en el manual de Hidráulica de Canales de Máximo Villón Béjar.

Obtención de las capacidades hidráulicas de detalles tipo

Para la obtención de las capacidades hidráulicas (caudal que cada elemento definido puede trasegar) de los detalles tipológicos, se procedió a asignar valores variables de pendientes para cada uno de los detalles de las cunetas, estas pendientes corresponden a la pendiente longitudinal y debería ser la misma pendiente que tenga la vía. En este proyecto para cada uno de los detalles tipo se asignaron cuatro valores de pendientes variables:

- La primera del 0,5 %, que sería la pendiente mínima recomendada para que el agua pueda fluir sin producir rebosamiento o estancamiento.
- La segunda del 10 %.
- La tercera del 20 %.
- La cuarta del 30 %.

Estos valores se determinaron a partir de las recomendaciones hechas por el profesor asesor.

El máximo se estableció debido a que a partir del 30 % de pendiente el terreno se considera montañoso y no es adecuado construir nada sobre una vía con esa pendiente, ya que cualquier material que se utilice se desplazaría y haría del proceso constructivo un desastre.

En el caso de las alcantarillas para efectos prácticos del presente proyecto, cada tipología se diseñó para un 2 %, sin embargo, la herramienta de cálculo que se elaboró permite al usuario modificar este valor, el cual debería de quedar definido entre el 0,5 % y el 4 %. Como se mencionó en el caso de las cunetas, el 0,5 % mínimo para que no se produzca rebosamiento y el 4 % como máximo para evitar que el flujo pase de laminar a turbulento.

Posteriormente se asignó el valor del coeficiente de rugosidad de *Manning* “n” para el material que se utiliza en los conductores, en este caso como se trabajó con concreto se procedió a utilizar una “n” de *Manning* de 0,015. Sin embargo, la hoja de cálculo permite modificar

este valor, incluso se podrían llegar a utilizar otros materiales y con ello una “n” de *Manning* diferente. Estos valores se pueden obtener a partir de la publicación de “Chow, Maidment, & Mays, 2004”. Con todos estos parámetros definidos se procede a calcular primero las velocidades de flujo para cada uno de los elementos tipológicos, utilizando la ecuación de flujo permanente y uniforme de Manning:

$$V = \frac{R^{2/3} * S^{1/2}}{n}$$

Luego se obtiene el caudal hidráulico de los elementos a partir de la siguiente fórmula:

$$Q = V * A$$

Se debe mencionar que se tiene que tomar en cuenta la velocidad erosiva del flujo para evitar daños a las estructuras, esto es importante considerarlo para el diseño hidráulico de las cunetas y esta velocidad está en función del tipo de material que lleve el elemento.

Para el caso del presente proyecto se consideraron los siguientes valores:

- Para cunetas revestidas una velocidad erosiva de: 3 m/s.
- Para el caso de cunetas de tierra o lastre una velocidad erosiva de 0,9 m/s.

Estos valores se obtuvieron a partir de las recomendaciones establecidas en el manual de Hidráulica de Canales de Máximo Villón Béjar y el Manual de Carreteras de California.

Cabe resaltar nuevamente que estos valores se pueden modificar por otros si así lo considera necesario el diseñador.

Parámetros hidrológicos para el diseño de detalles tipo

Para el presente proyecto se procedió a realizar una hoja de cálculo en formato Excel, en donde se introducen los valores relacionados a los parámetros hidrológicos propios de cada proyecto. Mediante la definición de estos valores es que se define el elemento a seleccionar, ya que se compara el caudal hidrológico con el

caudal hidráulico por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_{hidráulico} \geq 1,05 * Q_{hidrológico}$$

Los siguientes son los parámetros hidrológicos que se definieron para el cálculo del caudal hidrológico:

- Coeficiente de escorrentía “C” ponderado de la cuenca.
- Longitud “L” del punto más alejado de la cuenca al punto de estudio.
- Fondo tributario promedio del área de la cuenca (para el caso de las cunetas).
- Diferencia de altura “ΔH” entre el punto más alejado y el punto de estudio.
- Pendiente “S” de la cuenca.
- Periodo de retorno, en años.
- Área tributaria de la cuenca, en km².
- Tiempo de concentración, en minutos.
- Intensidad de lluvia “i”, en mm/h, para la zona de estudio del proyecto.

El tiempo de concentración se obtuvo a partir de la ecuación de “Kirpich-Ramser”:

$$T_c = 0,0195 * \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385}$$

El caudal hidrológico se determinó mediante la utilización del método racional, el cual consiste en la siguiente ecuación:

$$Q_{hidrológico} = \frac{C * I * A}{3,6}$$

Diseño de los elementos de drenaje

Para el caso del diseño de las cunetas, para cada uno de los elementos tipológicos la hoja de cálculo procede a despejar la longitud máxima por capacidad hidráulica y la longitud máxima por el efecto de la velocidad erosiva del flujo, para ello se debe introducir el ancho tributario promedio de la cuneta, el cual debe incluir el ancho del terreno aledaño a la vía más la mitad del ancho de la calzada y utilizar el coeficiente de

escorrentía ponderado más los demás parámetros hidrológicos descritos anteriormente.

De esta manera se pueden comparar varias alternativas de cunetas de acuerdo a los costos, forma, capacidad hidráulica o estética.

La idea de este dato es tomar decisiones en campo sobre qué elementos se pueden utilizar y el espaciamiento de los mismos. Por ejemplo, si se determina que para una cuneta determinada la longitud máxima por erosión es de 60 m, significa que para esa cuneta en específico a esa distancia se requiere colocar ya sea una alcantarilla, un aliviadero, un dique o algún elemento disipador de energía. Si se pudiese colocar una alcantarilla significa que el caudal será evacuado por lo que se puede utilizar una cuneta más pequeña y económica, sino fuera posible la colocación de una alcantarilla entonces deberán de colocarse elementos disipadores de energía a la distancia diseñada, pero se deberá escoger la cuneta para la capacidad hidráulica acorde a la longitud real que recorra el agua.

Para el caso del diseño de las alcantarillas se diseña el diámetro, además la hoja de cálculo permite visualizar cuál o cuáles detalles tipo cumple con la demanda requerida, permite incluir además la posibilidad de colocar más de una fila por paso de alcantarilla, lo que se recomienda es colocar un máximo de tres filas por paso. De esa manera se puede ver a partir de cual detalle cumple con la demanda requerida y seleccionar la mejor opción desde el punto de vista económico sin necesidad de incurrir en tanteos con otros detalles.

En el caso de los drenes y filtros para subdrenaje, los detalles recomiendan el diámetro mínimo del conducto, así como las especificaciones de permeabilidad y granulometría del material de relleno del filtro.

De esta manera se lograron determinar los detalles tipológicos para los elementos del sistema de drenaje, sin embargo, una de las novedades de este proyecto es que las hojas de cálculo permiten una gran flexibilidad en cuanto a la selección de los datos a introducir, como se mencionó se puede modificar el material del conducto, variando la “n” de *Manning*, si se quisiera trabajar con tubería Novaford o PVC, además se pueden cambiar las velocidades erosivas, la relación de talud “z”, las pendientes, el coeficiente de gasto adherido o tirante “y”, el número de filas que lleve un paso de alcantarillas, entre otras.

Análisis de la subrasante

Para el desarrollo del objetivo que se relaciona con el análisis de la subrasante por medio de la creación de un flujograma de evaluación y caracterización de la subrasante, se procedió primero a determinar los principales parámetros geotécnicos relacionados a las propiedades físicas y mecánicas requeridas en la ingeniería para el diseño de diversas estructuras, en este caso los pavimentos.

Parámetros físicos y mecánicos de los suelos de las subrasantes

Para la categorización de la subrasante se procedió a determinar los siguientes parámetros:

- Rango de CBR
- Tipo de suelo: Granular o fino
- Clasificación del suelo: Según SUCS y AASHTO
- Límites de Atterberg: Límite líquido (LL), Índice de plasticidad
- Presencia de nivel freático: Porcentaje de humedad natural (% Wnat) presente en el suelo
- Presencia de flujo subsuperficial
- Colorimetría característica según los tipos de suelos

Hay que recordar que estos parámetros se obtienen del estudio de geotecnia preliminar y definitiva por unidad homogénea de diseño, descritos en el marco teórico. Para la definición de los rangos de estos parámetros se procedió a realizar estudios de informes de laboratorios de suelos de diversos proyectos ejecutados por el autor de este documento. También se tomaron en cuenta las recomendaciones de la publicación sobre arcillas expansivas, su estudio y patología de Emilio Yanes, específicamente sobre criterios de peligrosidad de subrasantes, así como las recomendaciones hechas por el profesor asesor.

Los siguientes fueron los rangos de los parámetros que se utilizaron:

- Rangos de CBR: $\geq 4 \%$
 $< 4 \%$
- Tipo de suelo:
 - Granular: $\leq 35 \%$ pasa tamiz #200
 - Fino: $> 35 \%$ pasa tamiz #200
- Clasificación de suelos:
 - Para AASHTO:
 - Rangos: A1, A2, A3
 - Rangos: A4, A5, A6, A7
 - Para SUCS:
 - Suelos poco cohesivos
 - Limos inorgánicos-arcillas orgánicas
 - Arcillas inorgánicas.
- Límites de Atterberg:
 - Límite líquido (LL):
 - < 30
 - 30-70
 - > 70
 - Índice de plasticidad (IP):
 - < 20
 - 20-40
 - > 40
- Nivel freático: Se definieron dos rangos:
 - Sí se cuenta con la presencia de nivel freático
 - No se cuenta con la presencia de nivel freático.
- Nivel freático: Se definieron dos rangos:
 - Sí se cuenta con la presencia de nivel freático
 - No se cuenta con la presencia de nivel freático.
- Presencia de flujo subsuperficial: Se definieron dos rangos:
 - Sí se cuenta con la presencia de flujo
 - No se cuenta con la presencia de flujo

Uno de los principales problemas que se presenta en la gestión vial de las municipalidades es la falta de estudios geotécnicos, para tomar decisiones técnicas acertadas en cuanto a las obras que se tienen que hacer, principalmente las que se relacionan con drenajes superficiales y subsuperficiales y en cuanto a cómo se debe tratar una subrasante que, en algunos casos, además de ser débil puede ser peligrosa desde el punto de vista de la expansividad volumétrica.

En el caso de que se pueda realizar algún estudio viene el reto de poder interpretar esos resultados y proponer las recomendaciones adecuadas para el tratamiento de la subrasante y las obras requeridas para los drenajes. Es por esto que parte de la presente guía facilita mediante categoría una serie de acciones y recomendaciones a seguir con base en los diversos rangos encontrados para cada uno de los parámetros geotécnicos.

Matriz de categorías de subrasantes

Una vez que se definieron los parámetros anteriores con sus respectivos rangos, se procedió a categorizar por tipos a la subrasante, se definieron cuatro categorías:

- Tipo A
- Tipo B
- Tipo C
- Tipo D

Cada uno de estos tipos tiene rangos de valores y características que permiten al usuario de una manera muy general pero confiable, asociar su proyecto a alguna de estas categorías y posteriormente conocer una serie de acciones y recomendaciones a seguir, para el manejo adecuado de las obras a realizar en algún proyecto vial.

Matriz de acciones y condición futura esperada

Definidas las tipologías de las subrasantes, se establecieron para cada una de ellas, una serie de “acciones” a tomar en cuenta para su buen manejo y trato, como por ejemplo: mejorar la subrasante, sustituir suelos, reforzar con geotextil, colocar obras de subdrenajes como filtros o drenes. En este punto es importante mencionar que esta matriz hace referencia a algunos de los diseños tipos establecidos en el área de drenajes, como los detalles de filtros y drenes, así como la recomendación de utilizar una cuneta tipo, con orificios para abatir el nivel freático como mínimo 60 cm por debajo de la

estructura de pavimento, solo por citar algunos ejemplos. Además de las acciones a realizar, se estableció “la condición futura esperada”, que sería el objetivo de realizar dichas acciones y establece condiciones concretas que deberá tener la subrasante una vez realizadas dichas acciones, entre ellas se pueden mencionar: condición de flujo controlada, abatimiento del nivel freático, porcentaje de humedad natural (%Wnat) menor al 50 %, CBR de subrasante mejorada mayor o igual al 10 %, entre otras.

Flujograma de categorización de subrasantes

Finalmente, como parte del cumplimiento de los objetivos de este proyecto, se procedió a realizar un flujograma para la categorización de las subrasantes, el cual consistió en representar gráficamente lo que se estableció en las matrices definidas anteriormente. Esto con el fin de orientar y facilitar al lector la comprensión del contenido de la información relacionada a la subrasante.

Definición de los materiales

A continuación, los materiales que se utilizaron en las diferentes estructuras de pavimentos del presente proyecto:

Tabla 1. Materiales utilizados

Mezcla asfáltica
Concreto hidráulico
Tratamiento superficial
Adoquín de concreto
Base estabilizada con cemento
Base granular
Subbase granular

Propiedades de los materiales utilizadas

Para la determinación de las propiedades de los materiales que se utilizaron para realizar los diseños de las estructuras de pavimentos, se procedió a consultar los catálogos, manuales técnicos, manual de especificaciones técnicas

CR-2010 e informes de ensayos de materiales reales, de fuentes de materiales que existen en el mercado actualmente. Las siguientes corresponden a las principales propiedades mecánicas que se utilizaron para el diseño de las estructuras de pavimentos del presente proyecto:

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados		
Material	Propiedad mecánica	Valor
Mezcla asfáltica	Módulo dinámico "Emezcla" (PSI)	450000
	Módulo de Poisson " μ "	0,30
Concreto hidráulico	Módulo de elasticidad (PSI)	3,10E+06
	Módulo de ruptura (PSI)	600
	Módulo de Poisson " μ "	0,15
Tratamiento superficial	No se considera contribución	-----
Adoquín de concreto	Módulo de ruptura (PSI)	600
	Módulo de Poisson " μ "	0,15
Base estabilizada con cemento	Módulo de resiliencia (PSI)	7,00E+05
	Resistencia a la compresión inconfiada a los 7 días (PSI)	600
	Módulo de Poisson " μ "	0,15
Base granular	Módulo de resiliencia (PSI)	27900
	CBR (%)	80
	Módulo de Poisson " μ "	0,35
Subbase granular	Módulo de resiliencia (PSI)	15160
	CBR (%)	30
	Módulo de Poisson " μ "	0,35
Subrasante	Módulo de Poisson " μ "	0,40

Es importante mencionar que para efectos prácticos de este proyecto se definieron estos valores concretos para las propiedades de los materiales. Sin embargo, las herramientas de cálculo elaboradas para el diseño de los

espesores permiten modificar estos valores, a criterio del diseñador y acorde con los valores reales de las propiedades de los materiales con los que se cuente en el proyecto en específico.

Análisis de la variable tránsito

Para la definición de esta variable se procedió a realizar consultas de registros de la Red Vial Nacional de la cual se determinó una categoría de carreteras de bajo volumen, esto debido a que casi no se cuenta con registros de conteos vehiculares en la red vial cantonal, además se consultó información bibliográfica sobre clasificación vehicular según la región.

A continuación se presenta la información que se obtuvo de las diferentes fuentes consultadas, para la posterior definición de los volúmenes de tránsito para el diseño de los pavimentos:

Tipo de camino	Tipo de vehículo	Rango
Residencial	TPD	100 - 900
	% Vehículos pesados	0.5 - 1.5
	% Buses	0.5 - 2.0
Red Nacional	TPD	600 - 900
	% Buses	1.5 - 4.0
	% Carga Liviana	20 - 35
	% Vehículos Pesados	7.0 - 12
Rural	TPD	1300 - 2000
	% Vehículos pesados	1.0 - 2.5
	% Buses	1.0 - 2.0
Secundario recolector o Municipal	TPD	2000 - 5000
	% Vehículos pesados	1.0 - 2.0
	% Buses	1.0 - 3.0

Figura 42. Clasificación de tránsito para caminos de bajo volumen de Costa Rica (Fuente: Manual de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Fabricio Leiva, julio 2005).

Tipo de camino	Rango de vehículos pesados estimado en el periodo de diseño	Ejes Equivalentes
Tránsito liviano en zonas residenciales.	Menos de 7000	5000
Calles residenciales y caminos rurales.	De 7000 a 15000	10000
Calles recolectoras urbanas y caminos recolectores rurales.	De 70000 a 150000	100000
Arterias urbanas de tránsito industrial liviano y caminos recolectores mayores en zona rural.	De 700000 a 1500000	1000000

Figura 43. Clasificación de tránsito de diseño por el Instituto del Asfalto (Fuente: Manual de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Fabricio Leiva, julio 2005).

Tipo de camino	Tipo de vehículo	Vehículos por día	Vehículos por año	EEq por año
Residencial.	Vehículo liviano y carga liviana	500	200000	140
	Camiones y buses livianos	10	4000	80
	Camiones y buses pesados.	-	-	-
Rural	Vehículo liviano y carga liviana	1500	500000	300
	Camiones y buses livianos	20	7000	1800
	Camiones y buses pesados.	-	50	50
Secundario recolector	Vehículo liviano y carga liviana	3500	1300000	900
	Camiones y buses livianos	100	36500	9000
	Camiones y buses pesados.	20	7000	10000

Figura 44. Clasificación de tránsito vehicular aplicada por el estado de Washington (Fuente: Manual de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Fabricio Leiva, julio 2005).

Tipo de camino	TPD	Porcentaje vehículos pesados	ESAs para periodo de diseño
Carril único	30	3	1300
Menor con dos carriles	90	3	2000
Acceso local sin buses	400	4	19300
Acceso local con buses	500	6	48300
Acceso local en zona industrial	400	8	77200
Secundario sin buses	1200	6	152000
Secundario con buses	2000	7	355000

Figura 45. Clasificación de tránsito de diseño aplicado en Australia (Fuente: Manual de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Fabricio Leiva, julio 2005).

Estos datos no pretenden sustituir los conteos vehiculares que cada profesional debe realizar para cada caso específico de su proyecto, cada proyecto debe analizarse cuidadosamente y contar con información periódica de conteos vehiculares, la cual debe incluirse en los expedientes de caminos.

Al tomar en cuenta esta información más lo recomendado por el profesor asesor, se procedió a generar tres clasificaciones de volúmenes de tránsito vehiculares teóricas, para efecto de realizar los diseños de los paquetes estructurales del presente proyecto. A continuación, las clasificaciones vehiculares que se establecieron:

Tabla 3. Ejes equivalentes por carril de diseño para el periodo de diseño, por clasificaciones	
Clasificación	Esals (N) máximos
T1	5,00E+05
T2	1,00E+06
T3	5,00E+06

Para la definición de las clasificaciones, se tomaron en cuenta primero para el "T1" un

tránsito mínimo que podría llegar a tener una vía vecinal con un TPD de aproximadamente hasta 500 y de los cuales un 10 % representan vehículos pesados, recomendación que establece la AASHTO. Para el “T2” se consideró un tránsito que supera al anterior pero que podría corresponder a caminos que conectan zonas productivas, en donde se desarrollan actividades de índole agropecuaria, centros de acopio, industria agropecuaria y en donde el volumen de vehículos pesados aumenta e incluso con sobrecargas no permitidas, ya que en el ámbito de los caminos municipales es casi imposible contar con estaciones de pesaje, por lo que el deterioro de estas vías podría acelerarse.

Para el “T3” se consideró esta clasificación como una alternativa muy elevada en tránsito, ya que se debe considerar que, a la hora de hacer un mejoramiento de una vía, esta podría generar un tránsito atraído incluso de 2 a 3 veces el tránsito original, ya que al mejorarse la vía se empieza a generar todo un desarrollo económico entorno a esta.

Estructuras de los pavimentos

Como parte del cumplimiento de los objetivos del presente proyecto se procedió a realizar los diseños tipo para cada una de las estructuras de pavimentos propuestas.

Primero se propusieron seis tipos diferentes de estructuras de pavimentos, las cuales nacen de la práctica más frecuente dentro del ámbito municipal, además porque las mismas son las que se ajustan más a los presupuestos, tecnología, fuentes de materiales existentes, experiencia u otros aspectos que hacen que sean más sencillo utilizarlas.

Posteriormente para cada una de esas estructuras de pavimentos se propuso una serie de capas que la componen, de aquí surgió la necesidad de definir los materiales a utilizar junto con sus respectivas propiedades mecánicas, como se mencionó en el apartado de materiales. Hay que aclarar que esta propuesta de “paquetes de espesores” es para efectos de la elaboración del presente proyecto, sin embargo la hoja de cálculo en Excel permite modificar o crear

diferentes combinaciones de estructuras, por si el diseñador quisiese utilizar otra diferente a la propuesta. A continuación se presenta el resumen de las estructuras de pavimentos que se utilizaron con las respectivas capas que lo componen:

Tabla 4. Estructuras de pavimentos utilizadas	
Estructura de pavimento	Materiales utilizados
Flexible	Mezcla asfáltica
	Base granular
	Subbase granular
Flexible	Tratamiento superficial
	Base granular
	Subbase granular
Semi rígido	Mezcla asfáltica
	Base estabilizada con cemento
	Subbase granular
Semi rígido	Tratamiento superficial
	Base estabilizada con cemento
	Subbase granular
Articulado	Adoquín de concreto
	Base granular
	Subbase granular
Rígido	Concreto hidráulico
	Subbase granular

Criterios y selección de los parámetros de diseño

Para efectos de la realización de los diseños tipo de las estructuras de pavimentos descritas, se definieron los siguientes parámetros de diseño:

Capacidad de soporte de la subrasante

Para los diseños de los paquetes de espesores de cada una de las estructuras definidas se procedió de acuerdo al método de la AASHTO 1993, el cual utiliza como parámetro de diseño el módulo de resiliencia de la subrasante. Como se mencionó en el marco teórico existen una serie de fórmulas que correlacionan el CBR con el módulo resiliente. Para el caso del presente proyecto se utilizaron las fórmulas desarrolladas por Heukelom y Foster en 1960, las cuales corresponden al método Shell. A continuación las ecuaciones:

Para suelos finos y $CBR < 10 \%$:

$$Mr = 1500 * CBR \quad (PSI)$$

Para suelos granulares y $CBR \geq 10 \%$:

$$Mr = 130 * CBR^{0,714} \quad (kg/cm^2)$$

En la siguiente tabla se muestran los rangos de valores de CBR para la selección de la capacidad de soporte de la subrasante que se utilizaron en el presente proyecto:

Tabla 5. Rangos de CBR para diseño de espesores	
Clasificación	CBR (%)
I	≤ 4
II	5 - 9
III	≥ 10

Selección del nivel de confianza

Se consideraron los siguientes valores para la realización de los diseños:

- Confiabilidad "R": 85%
- Desviación normal estándar "Zr": 1,037
- Desviación estándar debido a proyecciones de tránsito y desempeño del pavimento "S0":
 - Para pavimentos flexibles: 0,49

- Para pavimentos rígidos: 0,39

Como se puede observar, los valores que se utilizaron son bastante conservadores, ya que se asume que se generarán errores en la estimación del tránsito y en el desempeño del pavimento, pues como se mencionó anteriormente, los municipios cuentan con datos de conteos vehiculares muy pobres, además de que no cuentan con estaciones de pesaje.

Serviciabilidad asignada

La serviciabilidad utilizada fue la siguiente:

- Para pavimentos flexibles:
 - P0: 4,2
 - Pt: 2
 - ΔPSI : 2,2
- Para pavimentos rígidos:
 - P0: 4,5
 - Pt: 2
 - ΔPSI : 2,5

Coeficientes de drenaje

Tanto para pavimentos rígidos como flexibles se utilizaron los coeficientes de drenaje "m2", y "m3" iguales a la unidad "1".

Transferencia de carga "J"

Para el diseño de pavimentos rígidos se consideró un factor "J" de transferencia de carga de 3,80, el cual significa un pavimento rígido sin dovelas en las juntas y un espaldón o berma flexible.

Otras premisas utilizadas para pavimentos rígidos

- Para el módulo de reacción "K" de la subrasante se utilizó la siguiente fórmula, en función de los módulos de resiliencia:

$$K = \frac{Mr}{19,4} \quad (PCI)$$

- Pérdida de soporte de la subrasante por erosión “LS”, se asumió igual a cero, lo que significa que no hay.
- Espesor de la subbase para el cálculo del módulo de reacción compuesto “Kcomp” de la subrasante para todos los diseños, se consideró 6 pulgadas (15 cm)
- No se consideró estrato de roca a menos de 5 pies (1,5 m) de profundidad.

Metodología de diseño

Como se mencionó, los paquetes de espesores de los diseños elaborados se realizaron utilizando el método de la AASHTO 1993. Para realizar la labor de una manera más ágil y expedita, se utilizó el *software* libre de diseño del ingeniero Luis Ricardo Vásquez Varela, de Manizales, Colombia, el cual utiliza las ecuaciones de la AASHTO para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos. A continuación la interfase del *software*:

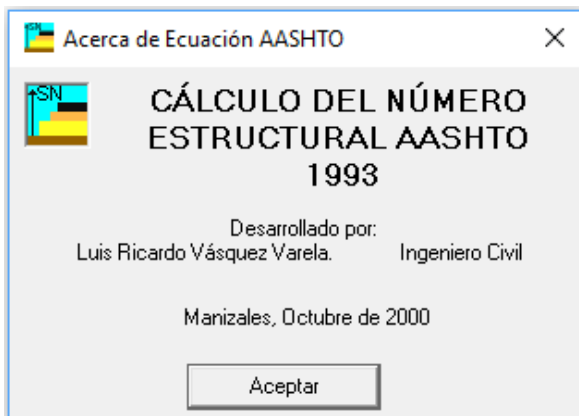


Figura 46. Interfase del software libre para el diseño de pavimentos por el método de la AASHTO 1993 (Fuente: Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela, octubre 2000).

Con este *software* se procedió a realizar los diseños para cada una de las combinaciones de los paquetes de espesores, en total se realizaron nueve diseños para cada una de las seis estructuras de pavimentos, para un total de cincuenta y cuatro (54) diseños.

A continuación se muestra la interfase del programa en donde se introducen los datos de entrada para el cálculo de los números estructurales y el espesor de la losa:

Figura 47. Ejemplo de entrada de datos para un diseño de pavimento flexible (Fuente: Elaboración propia).

Figura 48. Ejemplo de entrada de datos para un diseño de pavimento rígido (Fuente: Elaboración propia).

Criterios mecanísticos-empíricos

Cabe prevenir que estos espesores no se deben utilizar directamente como una solución definitiva, se recomienda realizar una verificación de los mismos mediante un análisis de fatiga y deformación permanente, utilizándolos como base para un diseño mecanístico-empírico, del cual ya se cuentan con *software* libre como por ejemplo el PITRA PAVE elaborado por LANAMME. En dicho *software* se pueden obtener los esfuerzos, deformaciones y deflexiones para los puntos de interés del usuario, el análisis se realiza mediante la teoría de multicapa elástica o elementos finitos y con estos datos y al utilizar la publicación especial: LM-PI-GM-INF-22-14, de LANAMME, se puede predecir el grado de deterioro de la estructura y compararlos con los

umbrales de falla establecidos y de esta manera determinar qué tan eficiente puede llegar a ser el diseño.

Para el presente proyecto se elaboró una hoja de cálculo específicamente para el análisis por fatiga, según la publicación mencionada, la cual es aplicable para pavimentos flexibles. En esta se debe introducir el valor de la deformación unitaria horizontal de tensión “ ϵ_t ”²⁷, que es la deformación que se produce en la base de la capeta y que es la responsable de producir el agrietamiento. Para la obtención de este valor se procedió a utilizar la ecuación de la teoría de Boussinesq, el análisis se hizo siguiendo la siguiente metodología:

- Se utilizó eje simple de rueda doble de 80 KN (18000 libras ó 8,2 ton).
- Área de contacto de las llantas: 2 círculos con radios de 115 mm ó 4,52”, espaciados 345 mm ó 13,57” centro a centro.
- Presión de inflado de llantas: 483 KPa ó 70 PSI.
- El punto de análisis se ubicó alineado justo debajo de la llanta, por debajo de la carpeta.

La siguiente es la ecuación utilizada:

$$\xi_r = \frac{(1+\nu) Q}{2 E} \left[1 - 2 \nu - \frac{2(1-\nu) z}{(a^2 + z^2)^{1/2}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right]$$

Control de las variables

Como último objetivo propuesto se definió la creación de una herramienta para el control y seguimiento de las variables o premisas de diseño, que al inicio de todo diseño se tienen que asumir de datos teóricos, así también incluye datos de interés del camino que se pueden utilizar para tomar decisiones a la hora de hacer un diseño. Lo más importante de esta

herramienta es contar con registros reales y que dichos registros se puedan medir con una frecuencia, por lo menos una vez al año, durante el periodo de diseño del proyecto, de manera que se pueda comparar la curva teórica de desempeño con la curva real.

Variables de diseño consideradas

Como se mencionó, la herramienta se elaboró para la determinación del deterioro por fatiga durante el periodo de diseño para los datos teóricos. A continuación las variables que se consideraron, que se recomienda se midan al menos una vez al año para compararlas con las teóricas y que a la vez sirvan de insumo para el futuro:

- Tránsito promedio diario
- % de vehículos pesados
- Tasa de crecimiento vehicular (anual)
- Grado de deterioro funcional (visual)
- Estado del camino
- Espesores de capas existentes

Estos datos se consideraron por recomendación del profesor asesor. Posteriormente la hoja de cálculo procede a graficar la curva de deterioro real con base en los datos de tránsito introducidos y evalúa el diseño. Este control permite tomar decisiones oportunas sobre el periodo de operación de la vía y si se requiere de alguna reinversión o rehabilitación durante el periodo de diseño, que permita levantar la curva de deterioro y así cumplir con el desempeño deseado del proyecto.

Para el cumplimiento de este objetivo se procedió a realizar un ejercicio completo, donde se muestra la introducción de los datos para el año 0, que serían los datos teóricos y los de los demás años, que son los que se deben ir llenando. Luego se muestra el cálculo de los ejes equivalentes con base en los factores camión que se presentan en los anexos, luego se calcula la curva teórica y la real para que el diseñador pueda evaluar el comportamiento.

²⁷ Terminología utilizada por el Instituto del Asfalto (MS-1), febrero 1991

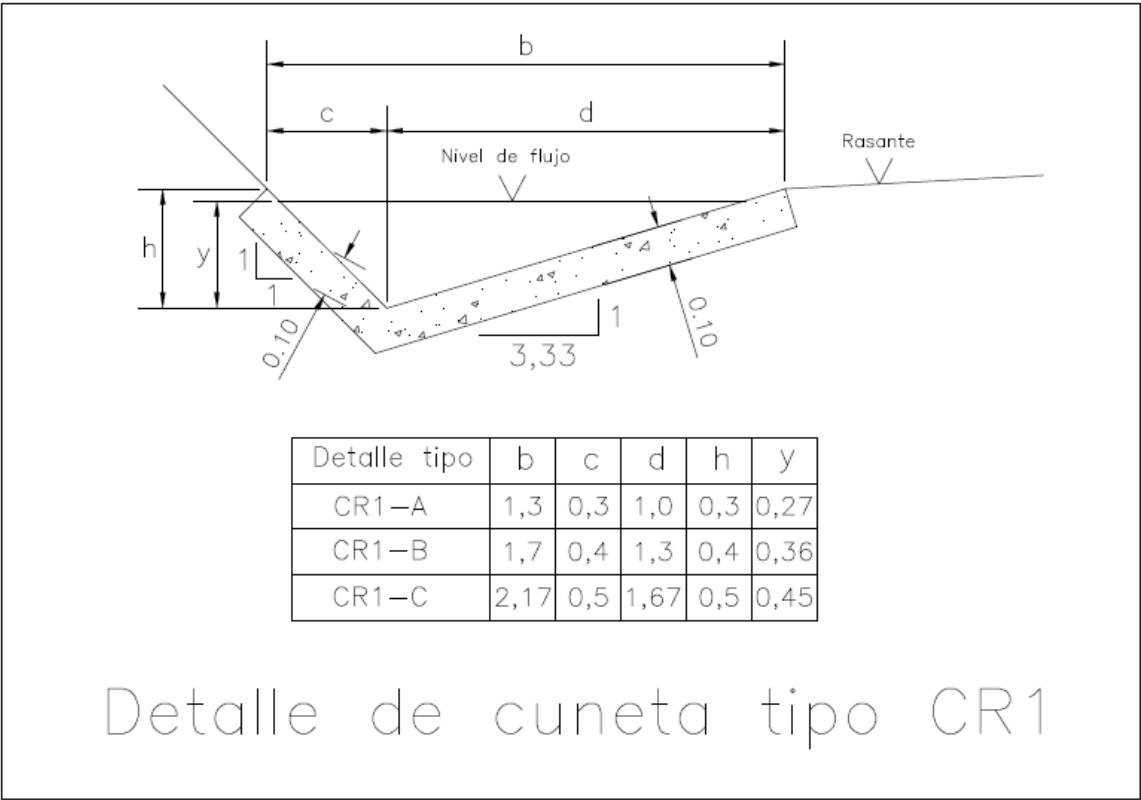
Resultados

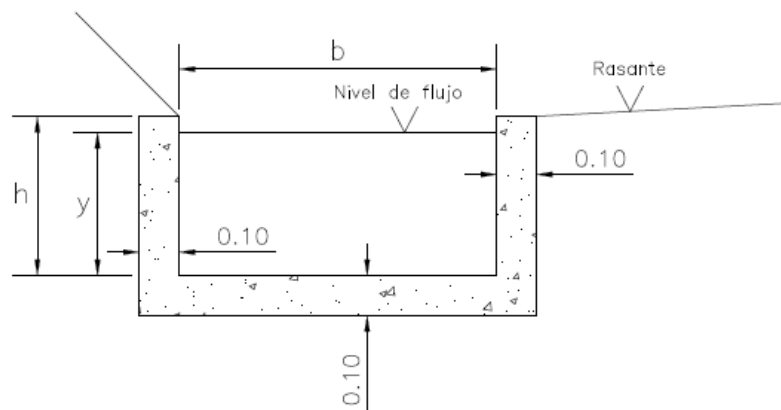
Detalles tipo y dimensiones de cunetas

A continuación se presentarán los resultados que se obtuvieron. Se seguirá la secuencia cronológica de

la metodología, empezando por los elementos del sistema de drenaje. Se presentan los detalles de las cunetas en los cuales se definen la geometría, dimensiones y forma, para cada tipología:

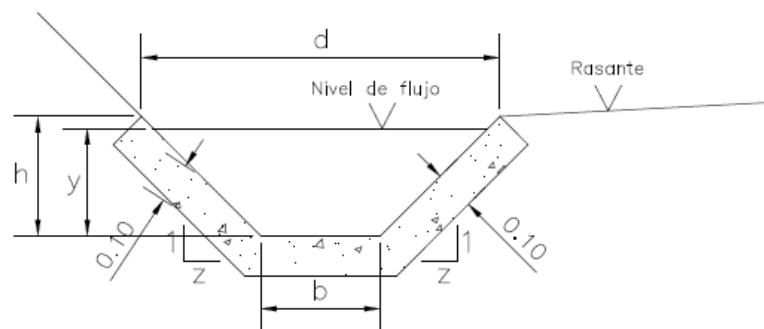
Gráfico 1. Diseños tipo de cunetas revestidas de concreto





Detalle tipo	b	h	y
CR2-A	0,8	0,4	0,36
CR2-B	1,0	0,5	0,45
CR2-C	1,2	0,6	0,54

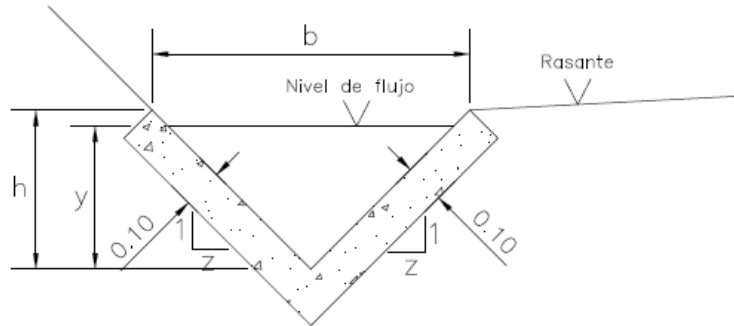
Detalle de cuneta tipo CR2



Z=1

Detalle tipo	b	d	h	y
CR3-A	0,3	0,9	0,3	0,27
CR3-B	0,4	1,2	0,4	0,36
CR3-C	0,5	1,5	0,5	0,45

Detalle de cuneta tipo CR3



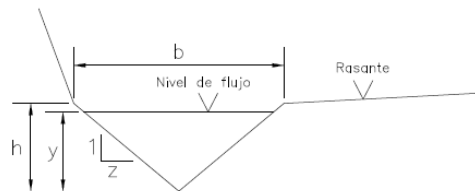
Z=1

Detalle tipo	b	h	y
CR4-A	0,8	0,4	0,36
CR4-B	1,0	0,5	0,45
CR4-C	1,2	0,6	0,54

Detalle de cuneta tipo CR4

Los siguientes corresponden a los detalles tipo de las cunetas de tierra y la de abatimiento de nivel freático, con sus respectivas dimensiones:

Gráfico 2. Diseños tipo de cunetas de tierra

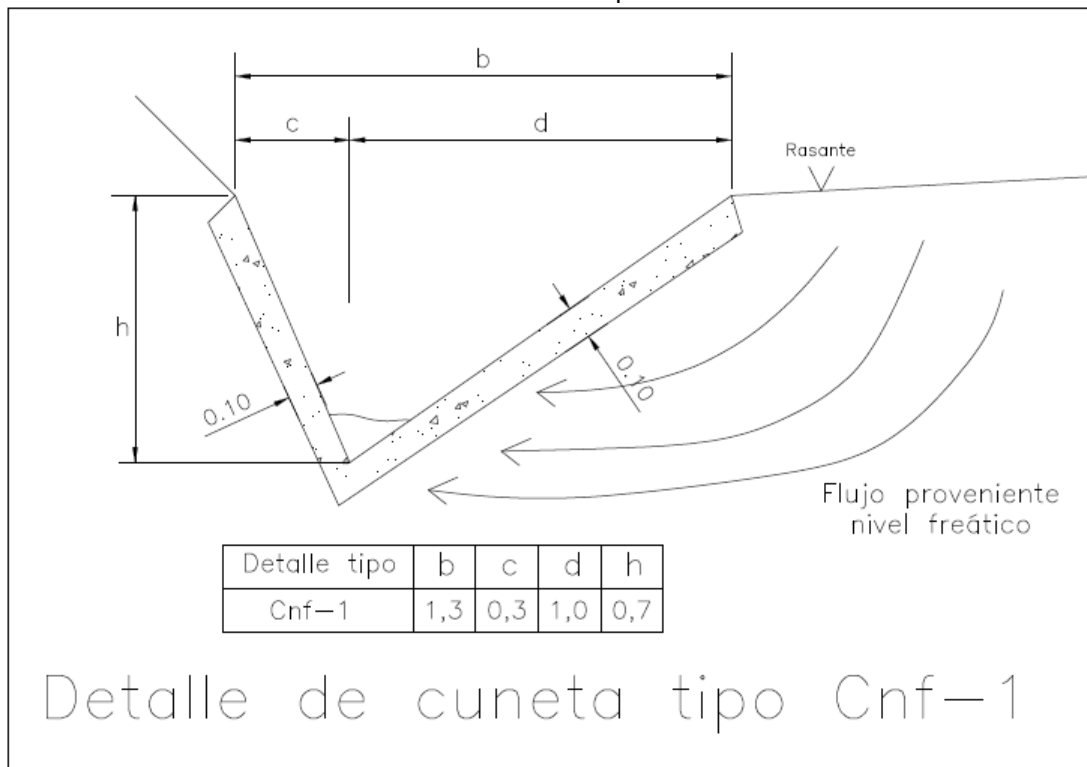


Z=1,2

Detalle tipo	b	h	y
CT-A	0,72	0,3	0,27
CT-B	0,96	0,4	0,36
CT-C	1,2	0,5	0,45

Detalle de cuneta de tierra tipo CT

Gráfico 3. Diseño de cuneta para nivel freático



Resumen de diseños tipo de alcantarillas para uso del usuario

A continuación se muestra la tabla de resumen de todos los diseños tipo de alcantarillas, tanto para las circulares menores, mayores y las de tipo bóveda. En esta tabla el usuario una vez determinado el caudal hidrológico para su caso, puede buscar el detalle que cumple con dicho caudal, dicho detalle tiene una simbología la cual más adelante se detallarán las dimensiones de cada una, cabe recordar que dichos valores ya contemplan el factor de seguridad de 1,05 para los caudales hidrológicos.

De esta manera el usuario puede comparar las diversas alternativas que cumplen para una misma condición, y hacer las valoraciones de tipo técnicas y presupuestarias.

TABLA 6. RESUMEN DE DETALLES TIPO DE ALCANTARILLAS Y SUS CAUDALES HIDROLÓGICOS MÁXIMOS ADMISIBLES					
Categoría	Detalle tipo	Caudal "Q" (m3/s) 1 fila	Caudal "Q" (m3/s) 2 filas	Caudal "Q" (m3/s) 3 filas	Velocidad "V" (m/s)
$\varnothing \leq 1,2 \text{ m}$	Alm-1	1,407	2,815	4,222	3,655
	Alm-2	1,927	3,853	5,780	3,953
	Alm-3	2,552	5,103	7,655	4,241
	Alm-4	4,149	8,299	12,448	4,789
$\varnothing > 1,2 \text{ m}$	AIM-1	5,680	11,361	17,041	5,180
	AIM-2	5,908	11,815	17,723	5,231
	AIM-3	7,523	15,046	22,570	5,557
	AIM-4	7,794	15,587	23,381	5,606
	AIM-5	10,178	20,356	30,533	5,993
	AIM-6	12,234	24,467	36,701	6,275
	AIM-7	12,785	25,570	38,355	6,345
	AIM-8	19,165	38,330	57,495	7,020
	ALM-9	27,534	55,068	82,602	7,686
TIPO BÓVEDA O CUADRADAS	Alc-1	5,129	10,257	15,386	4,824
	Alc-2	8,927	17,854	26,781	5,598
	Alc-3	13,011	26,021	39,032	6,119
	Alc-4	15,121	30,242	45,363	6,321
	Alc-5	22,468	44,937	67,405	7,045
	Alc-6	30,261	60,522	90,784	7,590
	Alc-7	38,360	76,720	115,080	8,018
	Alc-8	32,565	65,130	97,695	7,658
	Alc-9	44,327	88,655	132,982	8,339
	Alc-10	56,682	113,365	170,047	8,886
	Alc-11	59,044	118,088	177,132	8,886
	Alc-12	76,009	152,017	228,026	9,533
	Alc-13	96,012	192,024	288,036	10,034

Detalles tipo y dimensiones de alcantarillas

Los siguientes son los detalles tipo para las alcantarillas de concreto con base en las dimensiones nominales comerciales:

Gráfico 4. Diámetros nominales para alcantarillas circulares de concreto $\leq \varnothing 1,2\text{ m}$

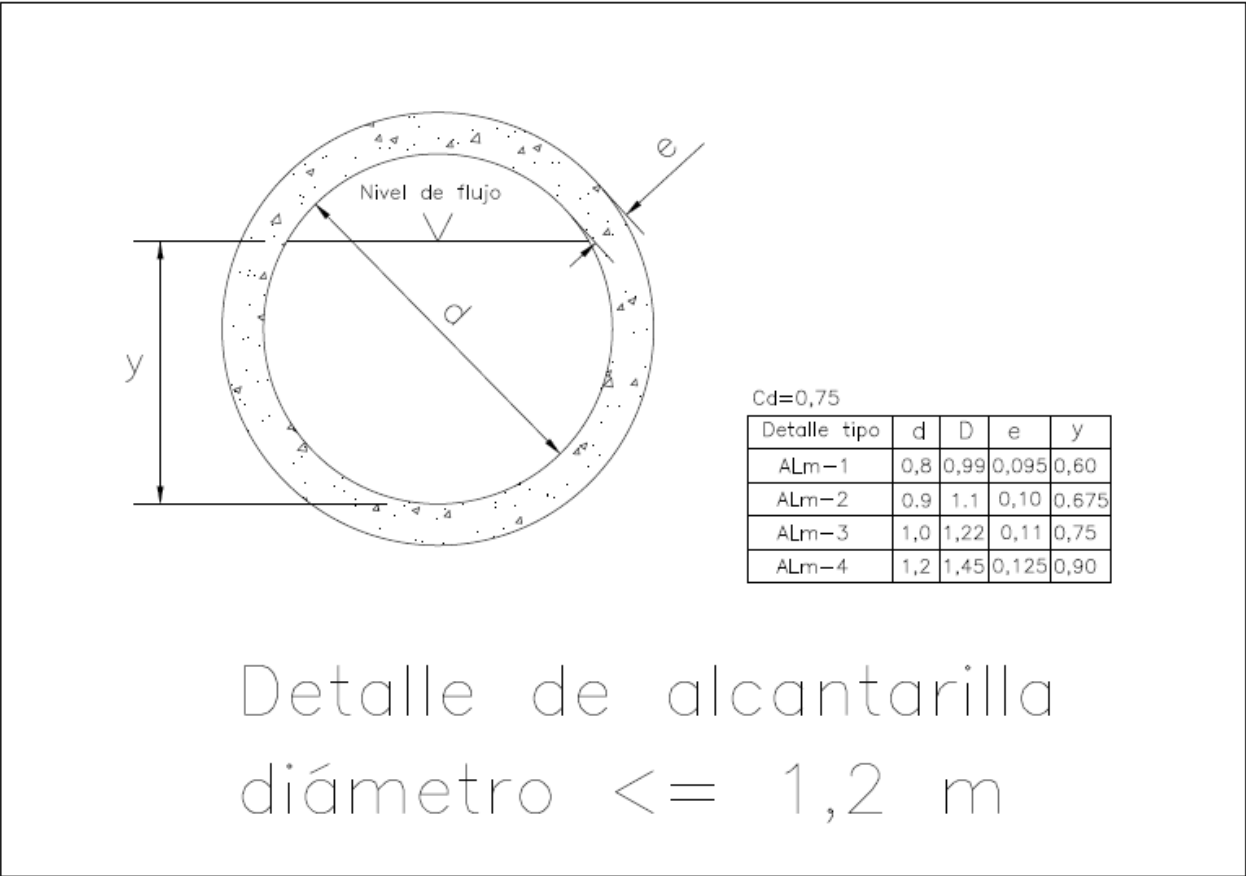
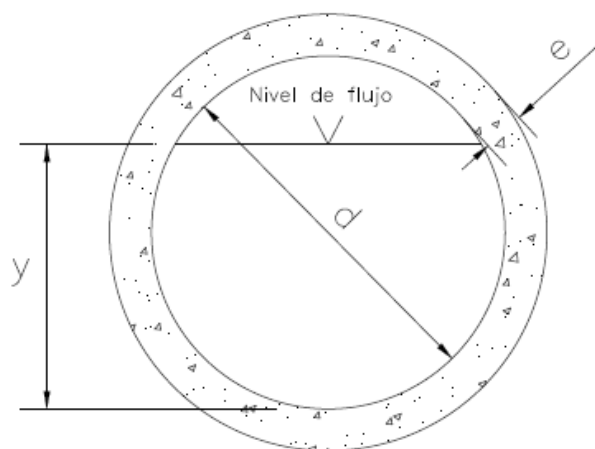


Gráfico 5. Diámetros nominales para alcantarillas circulares de concreto > Ø1, 2 m

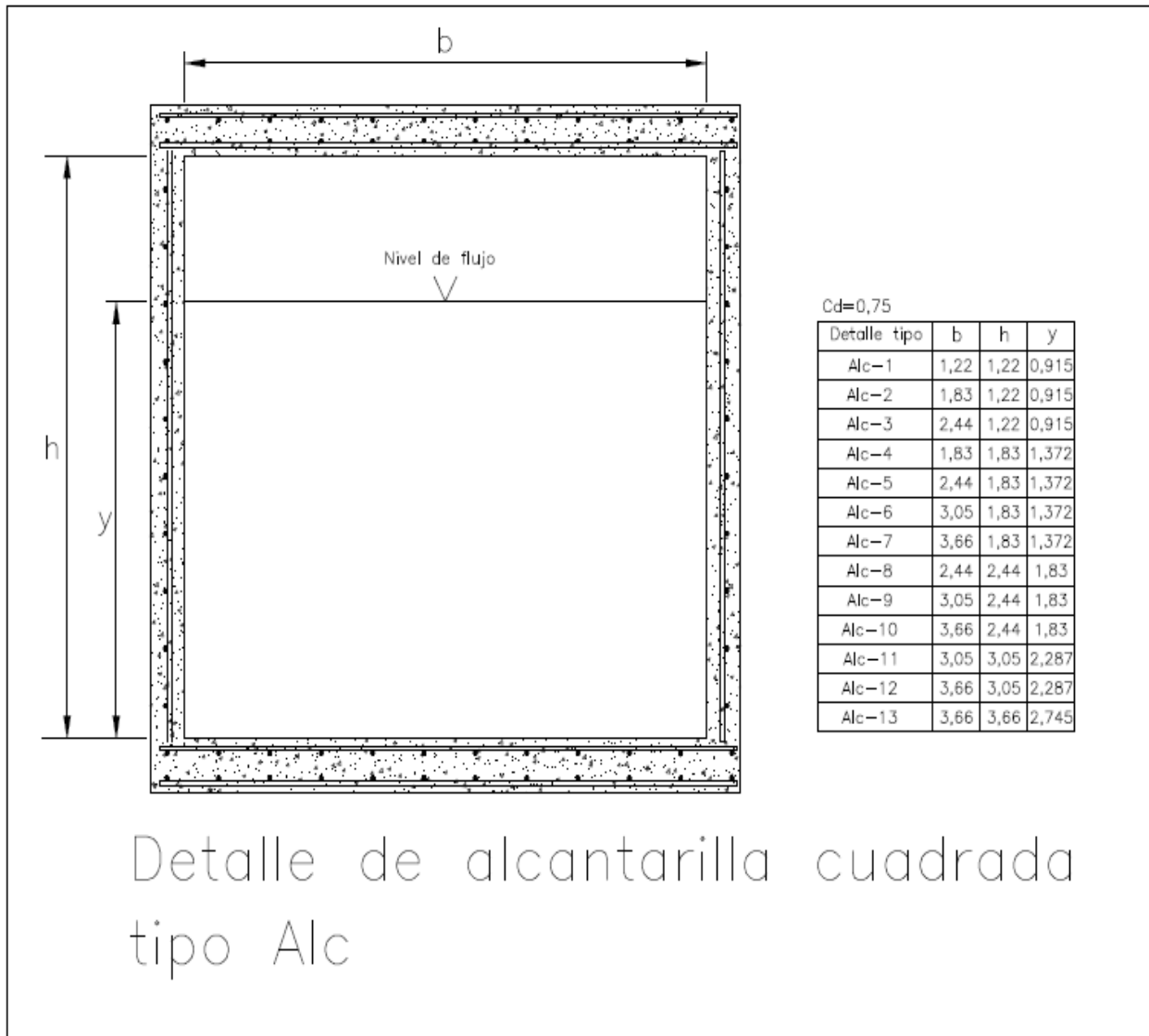


$C_d=0,75$

Detalle tipo	d	D	e	y
ALM-1	1,35	1,63	0,138	1,012
ALM-2	1,37	1,65	0,14	1,028
ALM-3	1,50	1,80	0,15	1,125
ALM-4	1,52	1,82	0,152	1,14
ALM-5	1,68	2,01	0,165	1,26
ALM-6	1,80	2,15	0,175	1,35
ALM-7	1,83	2,19	0,178	1,372
ALM-8	2,13	2,64	0,254	1,597
ALM-9	2,44	3,02	0,29	1,83

Detalle de alcantarilla
diámetro > 1,2 m

Gráfico 6. Diseños tipo y dimensiones nominales de alcantarillas tipo bóveda o de cuadro



Detalles tipo de sistemas de subdrenajes

Los siguientes son los detalles tipo para subdrenajes, mediante drenes longitudinales, transversales y filtros tipo francés:

Gráfico 7. Detalle de drenes longitudinales

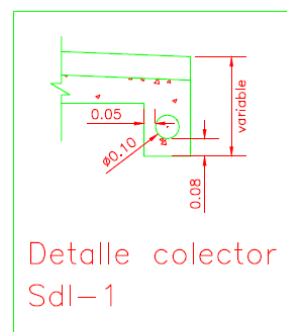
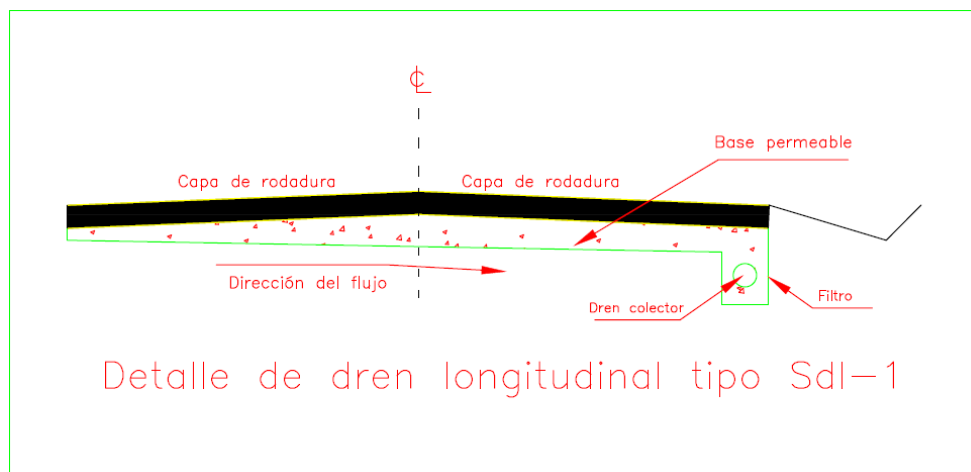


Gráfico 8. Detalle de drenes transversales

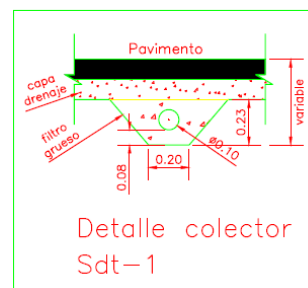
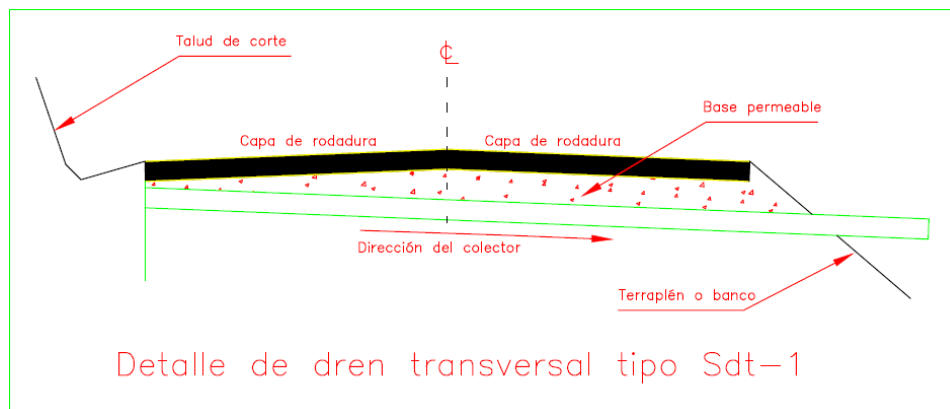
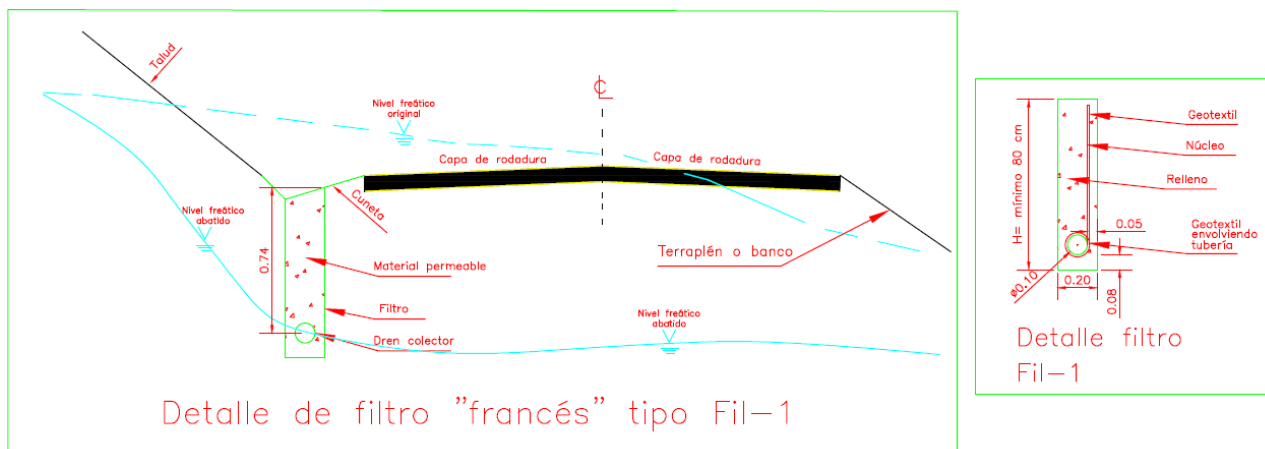


Gráfico 9. Detalle de filtro tipo “francés”



Propiedades geométricas de detalles tipo de drenajes

A continuación se presenta el resultado del cálculo de las propiedades geométricas para cada uno de los elementos tipos de cunetas y alcantarillas:

Tabla 7. Propiedades geométricas de detalles tipológicos de cunetas revestidas de concreto								
Coeficiente de gasto adherido "Cd" (relación y/h)				0,9	Relación de talud "z" =			1
Detalle tipo	"b" ancho (m)	"h" profundidad (m)	"y" tirante (m)	c (m)	d (m)	Área hidráulica (m ²)	Perímetro mojado (m)	Radio hidráulico (m)
CR1-A	1,3	0,3	0,27	0,3	1	0,158	1,321	0,120
CR1-B	1,7	0,4	0,36	0,4	1,3	0,281	1,762	0,159
CR1-C	2,17	0,5	0,45	0,5	1,67	0,439	2,202	0,199
CR2-A	0,8	0,4	0,36	-	-	0,288	1,520	0,189
CR2-B	1	0,5	0,45	-	-	0,450	1,900	0,237
CR2-C	1,2	0,6	0,54	-	-	0,648	2,280	0,284
CR3-A	0,3	0,3	0,27	-	0,9	0,154	1,064	0,145
CR3-B	0,4	0,4	0,36	-	1,2	0,274	1,418	0,193
CR3-C	0,5	0,5	0,45	-	1,5	0,428	1,773	0,241
CR4-A	0,8	0,4	0,36	-	-	0,130	1,018	0,127
CR4-B	1	0,5	0,45	-	-	0,203	1,273	0,159
CR4-C	1,2	0,6	0,54	-	-	0,292	1,527	0,191
Tabla 8. Propiedades geométricas de detalle tipológico de cuneta de tierra								
Coeficiente de gasto adherido "Cd" (relación y/h)				0,9	Relación de talud "z" =			1,2
Detalle tipo	"b" ancho (m)	"h" profundidad (m)	"y" tirante (m)	c (m)	d (m)	Área hidráulica (m)	Perímetro mojado (m)	Radio hidráulico (m)
CT-A	0,72	0,3	0,27	-	-	0,087	0,844	0,104
CT-B	0,96	0,4	0,36	-	-	0,156	1,125	0,138
CT-C	1,2	0,5	0,45	-	-	0,243	1,406	0,173

Tabla 9. Propiedades geométricas de detalles tipo de alcantarillas circulares de concreto							
Coeficiente de gasto adherido "Cd" (Relación y/d)							0,75
Detalle tipo	"d" diámetro interno (m)	"D" diámetro externo (m)	"y" tirante (m)	Espesor de pared "e" (m)	Área hidráulica (m2)	Perímetro mojado (m)	Radio hidráulico (m)
Diámetros internos menores o iguales a 1,2 m							
Alm-1	0,8	0,99	0,6	0,095	0,404	1,676	0,241
Alm-2	0,9	1,1	0,675	0,1	0,512	1,885	0,271
Alm-3	1	1,22	0,75	0,11	0,632	2,094	0,302
Alm-4	1,2	1,45	0,9	0,125	0,910	2,513	0,362
Diámetros internos mayores a 1,2 m							
ALM-1	1,35	1,626	1,0125	0,138	1,151	2,827	0,407
ALM-2	1,37	1,65	1,0275	0,14	1,186	2,869	0,413
ALM-3	1,5	1,8	1,125	0,15	1,422	3,142	0,452
ALM-4	1,52	1,824	1,14	0,152	1,460	3,183	0,459
ALM-5	1,68	2,01	1,26	0,165	1,783	3,519	0,507
ALM-6	1,8	2,15	1,35	0,175	2,047	3,770	0,543
ALM-7	1,83	2,186	1,3725	0,178	2,116	3,833	0,552
ALM-8	2,13	2,638	1,5975	0,254	2,866	4,461	0,643
ALM-9	2,44	3,02	1,83	0,29	3,761	5,110	0,736

Tabla 10. Propiedades geométricas de detalles tipo de alcantarillas cuadradas de concreto						
Coeficiente de gasto adherido "Cd" (Relación y/d)						0,75
Detalle tipo	"b" Ancho (m)	"h" Altura (m)	"y" tirante (m)	Área hidráulica (m2)	Perímetro mojado (m)	Radio hidráulico (m)
Alc-1	1,22	1,22	0,915	1,116	3,050	0,366
Alc-2	1,83	1,22	0,915	1,674	3,660	0,458
Alc-3	2,44	1,22	0,915	2,233	4,270	0,523
Alc-4	1,83	1,83	1,3725	2,512	4,575	0,549
Alc-5	2,44	1,83	1,3725	3,349	5,185	0,646
Alc-6	3,05	1,83	1,3725	4,186	5,795	0,722
Alc-7	3,66	1,83	1,3725	5,023	6,405	0,784
Alc-8	2,44	2,44	1,83	4,465	6,100	0,732
Alc-9	3,05	2,44	1,83	5,582	6,710	0,832
Alc-10	3,66	2,44	1,83	6,698	7,320	0,915
Alc-11	3,05	3,05	2,2875	6,977	7,625	0,915
Alc-12	3,66	3,05	2,2875	8,372	8,235	1,017
Alc-13	3,66	3,66	2,745	10,047	9,150	1,098

Capacidades hidráulicas de los detalles tipo de drenajes

Las siguientes tablas corresponden a los resultados generados del cálculo de las capacidades hidráulicas de las cunetas y

alcantarillas tipo, definidas en los detalles anteriores. Este caudal se obtuvo a partir de la ecuación de *Manning* para flujo permanente y uniforme:

Tabla 11. Capacidades hidráulicas de los diferentes detalles tipológicos de las cunetas de concreto en función de las pendientes de la vía "S"				
Detalle tipo	"S" vía (%)	Coefficiente de Manning "n"	Caudal "Q" (m ³ /s)	Velocidad "V" (m/s)
CR1-A	0,5%	0,015	0,18	1,14
	10,0%		0,81	5,12
	20,0%		1,14	7,24
	30,0%		1,40	8,86
CR1-B	0,5%	0,015	0,39	1,39
	10,0%		1,74	6,20
	20,0%		2,46	8,76
	30,0%		3,01	10,73
CR1-C	0,5%	0,015	0,71	1,61
	10,0%		3,15	7,19
	20,0%		4,46	10,17
	30,0%		5,46	12,45
CR2-A	0,5%	0,015	0,45	1,56
	10,0%		2,00	6,95
	20,0%		2,83	9,84
	30,0%		3,47	12,05
CR2-B	0,5%	0,015	0,81	1,80
	10,0%		3,63	8,07
	20,0%		5,14	11,41
	30,0%		6,29	13,98
CR2-C	0,5%	0,015	1,32	2,04
	10,0%		5,91	9,11
	20,0%		8,35	12,89
	30,0%		10,23	15,78

Tabla 11. Continuación				
Detalle tipo	"S" vía (%)	Coefficiente de Manning "n"	Caudal "Q" (m ³ /s)	Velocidad "V" (m/s)
CR3-A	0,5%	0,015	0,20	1,30
	10,0%		0,89	5,81
	20,0%		1,26	8,22
	30,0%		1,55	10,06
CR3-B	0,5%	0,015	0,43	1,57
	10,0%		1,93	7,04
	20,0%		2,72	9,95
	30,0%		3,34	12,19
CR3-C	0,5%	0,015	0,78	1,83
	10,0%		3,49	8,17
	20,0%		4,94	11,55
	30,0%		6,05	14,15
CR4-A	0,5%	0,015	0,15	1,19
	10,0%		0,69	5,33
	20,0%		0,98	7,54
	30,0%		1,20	9,24
CR4-B	0,5%	0,015	0,28	1,38
	10,0%		1,25	6,19
	20,0%		1,77	8,75
	30,0%		2,17	10,72
CR4-C	0,5%	0,015	0,46	1,56
	10,0%		2,04	6,99
	20,0%		2,88	9,89
	30,0%		3,53	12,11

Tabla 12. Capacidades hidráulicas de detalles tipológicos de las cunetas de tierra en función de las pendientes de la vía "S"				
Detalle tipo	"S" vía (%)	Coefficiente de Manning "n"	Caudal "Q" (m ³ /s)	Velocidad "V" (m/s)
CT-A	0,5%	0,025	0,05	0,62
	10,0%		0,24	2,79
	20,0%		0,35	3,95
	30,0%		0,42	4,84
CT-B	0,5%	0,025	0,12	0,76
	10,0%		0,53	3,38
	20,0%		0,74	4,78
	30,0%		0,91	5,86
CT-C	0,5%	0,025	0,21	0,88
	10,0%		0,95	3,92
	20,0%		1,35	5,55
	30,0%		1,65	6,80

Tabla 13. Capacidades hidráulicas de detalles tipo de alcantarillas circulares de concreto en función de su pendiente "S"				
Detalle tipo	"S"alcantarilla (%)	Coefficiente de Manning "n"	Caudal "Q" (m ³ /s)	Velocidad "V" (m/s)
Diámetros internos menores o iguales a 1,2 m				
Alm-1	2%	0,015	1,48	3,65
Alm-2	2%	0,015	2,02	3,95
Alm-3	2%	0,015	2,68	4,24
Alm-4	2%	0,015	4,36	4,79
Diámetros internos mayores a 1,2 m				
AIM-1	2%	0,015	5,96	5,18
AIM-2	2%	0,015	6,20	5,23
AIM-3	2%	0,015	7,90	5,56
AIM-4	2%	0,015	8,18	5,61
AIM-5	2%	0,015	10,69	5,99
AIM-6	2%	0,015	12,85	6,28
AIM-7	2%	0,015	13,42	6,34
AIM-8	2%	0,015	20,12	7,02
ALM-9	2%	0,015	28,91	7,69

Tabla 14. Capacidades hidráulicas de detalles tipo de alcantarillas cuadradas de concreto en función de su pendiente "S"				
Detalle tipo	"S"alcantarilla (%)	Coefficiente de manning "n"	Caudal "Q" (m3/s)	Velocidad "V" (m/s)
Alc-1	2%	0,015	5,39	4,82
Alc-2	2%	0,015	9,37	5,60
Alc-3	2%	0,015	13,66	6,12
Alc-4	2%	0,015	15,88	6,32
Alc-5	2%	0,015	23,59	7,04
Alc-6	2%	0,015	31,77	7,59
Alc-7	2%	0,015	40,28	8,02
Alc-8	2%	0,015	34,19	7,66
Alc-9	2%	0,015	46,54	8,34
Alc-10	2%	0,015	59,52	8,89
Alc-11	2%	0,015	62,00	8,89
Alc-12	2%	0,015	79,81	9,53
Alc-13	2%	0,015	100,81	10,03

Parámetros hidrológicos y diseño de los drenajes

Los siguientes resultados muestran los datos de los parámetros hidrológicos que se definieron en la metodología y el marco teórico. Estos valores son los que el diseñador debe recopilar para cada proyecto en particular, luego proceder a insertarlos en las celdas de la hoja de cálculo.

En el caso de las cunetas la hoja de cálculo procede a calcular para cada diseño tipo definido, dos valores: la longitud máxima por velocidad erosiva y la longitud máxima por capacidad hidráulica.

En el caso de las alcantarillas la hoja de cálculo procede a calcular cuáles de todos los diámetros y detalles tipos definidos cumplen con la demanda requerida para el proyecto, de manera que el diseñador pueda añadir filas

para un mismo paso de alcantarilla, se recomienda añadir hasta un máximo de tres filas por paso. De esta manera se pueden comparar varias alternativas de alcantarillas y tomar decisiones con base en aspectos técnicos y de costos.

Para la obtención de los datos que se mostrarán en las siguientes tablas se utilizó un ejemplo hipotético para realizar el ejercicio y mostrar el funcionamiento de la hoja de cálculo, porque como se mencionó anteriormente, los datos de los parámetros hidrológicos son propios para cada proyecto en particular.

Tabla 15. Longitudes máximas de cunetas por tipologías en función de la capacidad hidráulica, velocidad erosiva y pendientes de la vía "S", para un ejemplo específico			
Coeficiente de escorrentía ponderado de la cuenca		0,6	
Pendiente de la cuenca aledaña a la cuneta		30%	
Periodo de retorno (años)		25	
Fondo tributario promedio del área de la cuenca (m)		50	
Tiempo de concentración "Kirpich" (min)		0,63	
Intensidad de lluvia "I" (mm/h), hoja Liberia		372,18	
Velocidad erosiva (m/s) "según tabla"		3,00	
Detalle tipo	"S" vía (%)	Longitud máxima permisible para corte de aguas (m)	Longitud máxima por capacidad hidráulica (m)
CR1-A	0,5%	55,37	55,37
	10,0%	145,19	247,62
	20,0%	145,19	350,19
	30,0%	145,19	428,90
CR1-B	0,5%	119,18	119,18
	10,0%	258,03	533,00
	20,0%	258,03	753,78
	30,0%	258,03	923,19
CR1-C	0,5%	216,05	216,05
	10,0%	403,12	966,21
	20,0%	403,12	1366,42
	30,0%	403,12	1673,52
CR2-A	0,5%	137,18	137,18
	10,0%	264,64	613,50
	20,0%	264,64	867,62
	30,0%	264,64	1062,61
CR2-B	0,5%	248,73	248,73
	10,0%	413,50	1112,35
	20,0%	413,50	1573,09
	30,0%	413,50	1926,64
CR2-C	0,5%	404,46	404,46
	10,0%	595,45	1808,80
	20,0%	595,45	2558,03
	30,0%	595,45	3132,93

Tabla 15. Continuación

Detalle tipo	"S" vía (%)	Longitud máxima permisible para corte de aguas (m)	Longitud máxima por capacidad hidráulica (m)
CR3-A	0,5%	61,24	61,24
	10,0%	141,42	273,89
	20,0%	141,42	387,34
	30,0%	141,42	474,40
CR3-B	0,5%	131,90	131,90
	10,0%	251,41	589,86
	20,0%	251,41	834,19
	30,0%	251,41	1021,67
CR3-C	0,5%	239,15	239,15
	10,0%	392,83	1069,49
	20,0%	392,83	1512,49
	30,0%	392,83	1852,41
CR4-A	0,5%	47,35	47,35
	10,0%	119,09	211,75
	20,0%	119,09	299,47
	30,0%	119,09	366,77
CR4-B	0,5%	85,85	85,85
	10,0%	186,08	383,94
	20,0%	186,08	542,97
	30,0%	186,08	665,00
CR4-C	0,5%	139,60	139,60
	10,0%	267,95	624,32
	20,0%	267,95	882,92
	30,0%	267,95	1081,36

Tabla 16. Longitudes máximas de cunetas de tierra por tipologías en función de la capacidad hidráulica, velocidad erosiva y pendientes de la vía "S", para un ejemplo específico			
Coeficiente de escorrentía ponderado de la cuenca		0,6	
Pendiente de la cuenca aledaña a la cuneta		30%	
Periodo de retorno (años)		25	
Fondo tributario promedio del área de la cuenca (m)		50	
Tiempo de concentración (min)		0,63	
Intensidad de lluvia "I" (mm/h), hoja Liberia		372,18	
Velocidad erosiva (m/s) "según tabla"		0,90	
Detalle tipo	"S" vía (%)	Longitud máxima permisible para corte de aguas (m)	Longitud máxima por capacidad hidráulica (m)
CR1-A	0,5%	16,73	16,73
	10,0%	24,12	74,82
	20,0%	24,12	105,81
	30,0%	24,12	129,59
CR1-B	0,5%	36,03	36,03
	10,0%	42,87	161,13
	20,0%	42,87	227,87
	30,0%	42,87	279,08
CR1-C	0,5%	65,32	65,32
	10,0%	66,99	292,14
	20,0%	66,99	413,15
	30,0%	66,99	506,00

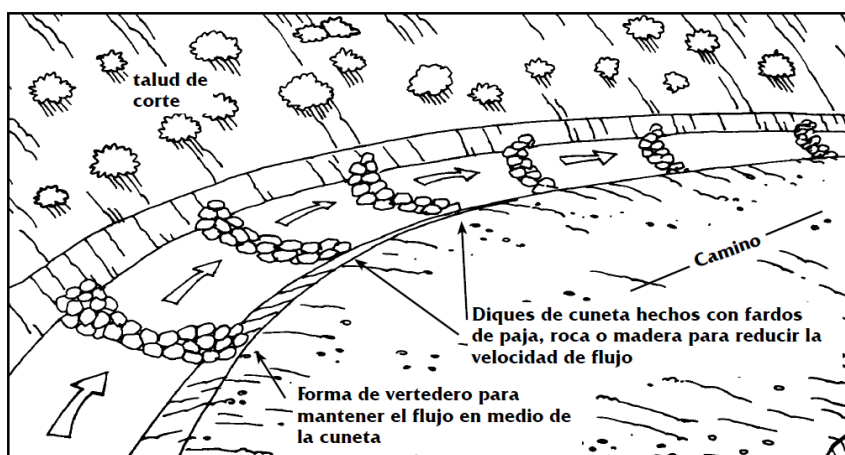


Figura 49. Recomendaciones de elementos disipadores de energía en cunetas con velocidades erosivas (Fuente: Ingeniería de caminos rurales. Gordon Keller & James Sherar).

PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	Tabla 17. Criterios de selección de alcantarillas circulares en función de parámetros hidrológicos, para un ejemplo específico		
	Coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca		0,53
	Longitud más larga de cuenca "L" (m)		1000
	Diferencia de altura de la cuenca "H" (m)		80
	Periodo de retorno (años)		25
	Área tributaria de la cuenca (Km2)		2
	Tiempo de concentración "Kirpich" (min)		10,53
	Intensidad de lluvia "I" (mm/h), hoja Liberia		191,81
	Caudal hidrológico "Q" (m3/s)		56,48
	Caudal sólido "Qs" (m3/s)		
	Detalle tipo	Número de filas (máximo 3)	Criterio de idoneidad
$\varnothing \leq 1,2 \text{ m}$	Alm-1	1	No cumple
	Alm-2	1	No cumple
	Alm-3	1	No cumple
	Alm-4	1	No cumple
$\varnothing > 1,2 \text{ m}$	AlM-1	1	No cumple
	AlM-2	1	No cumple
	AlM-3	1	No cumple
	AlM-4	1	No cumple
	AlM-5	1	No cumple
	AlM-6	1	No cumple
	AlM-7	2	No cumple
	AlM-8	3	Cumple
	AlM-9	3	Cumple

PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	Tabla 18. Criterios de selección de alcantarillas cuadradas en función de parámetros hidrológicos, para un ejemplo específico		
	Coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca		0,53
	Longitud más larga de cuenca "L" (m)		3930
	Diferencia de altura de la cuenca "H" (m)		238
	Periodo de retorno (años)		25
	Área tributaria de la cuenca (Km2)		4,75
	Tiempo de concentración "Kirpich" (min)		33,62
	Intensidad de lluvia "I" (mm/h), hoja Liberia		117,43
	Caudal hidrológico "Q" (m3/s)		82,12
	Caudal sólido "Qs" (m3/s)		
DETALLES TIPOLOGICOS	Detalle tipo	Número de filas (máximo 3)	Criterio de idoneidad
	Alc-1	1	No cumple
	Alc-2	1	No cumple
	Alc-3	1	No cumple
	Alc-4	1	No cumple
	Alc-5	1	No cumple
	Alc-6	1	No cumple
	Alc-7	1	No cumple
	Alc-8	3	Cumple
	Alc-9	2	Cumple
	Alc-10	2	Cumple
	Alc-11	2	Cumple
	Alc-12	2	Cumple
	Alc-13	1	Cumple

Matrices y flujograma para la evaluación de las subrasantes

En cuanto al análisis de la subrasante, a continuación se presentan las matrices de categorización de la misma, la matriz de acciones y condición futura esperada y el flujograma de evaluación, que pretenden servir de guía al

diseñador para tomar decisiones en la fase de planeamiento de los proyectos viales:

Tabla 19. Matriz de categorización de subrasantes

Categoría	Rangos de CBR	% pasa por tamiz # 200	Tipo de suelo, según AASHTO	Clasificación			Límites de Atterberg	
				Familias de suelos según carta de plasticidad	AASHTO	Colores característicos	Índice de plasticidad (IP)	Límite líquido (LL)
TIPO A	≥ 4	$\leq 35 \%$	Granular	Suelos poco cohesivos (granulares)	A1-A2-A3		< 20	< 30
TIPO B	≥ 4	> 35 %	Fino	Limos inorgánicos, Arcillas orgánicas	A4-A5-A6-A7		20-40	30-70
TIPO C	< 4	> 35 %	Fino	Limos inorgánicos, Arcillas orgánicas	A4-A5-A6-A7		20-40	30-70
TIPO D	< 4	> 35 %	Fino	Arcillas inorgánicas	A4-A5-A6-A7		> 40	> 70

Tabla 20. Matriz de recomendaciones a realizar en subrasantes tipo "A", en función de las condiciones de humedad y flujo

Categoría	Presencia de nivel freático "Wnat" (%)	Presencia de flujo interno	Posibles acciones a realizar	Condición futura esperada
TIPO A	No	Sí	Colocar filtros, detalle: Fil-1 Diseñar estructura de pavimento	Condición de flujo controlada Reducción de humedad, Wnat < 40%
		No	Diseñar estructura de pavimento	Condición óptima para colocar estructura de pavimento
	Sí	Sí	Colocar filtros, detalle: Fil-1 Colocar drenes: Sdl-1, Sdlt-1 o detalle de cuneta: Cnf-1 Diseñar estructura de pavimento	Condición de flujo controlada Reducción de humedad, Wnat < 40%
			Colocar drenes: Sdl-1, Sdlt-1 o detalle de cuneta: Cnf-1 Diseñar estructura de pavimento	Abatimiento de nivel freático Reducción de humedad, Wnat < 40%
		No	Colocar drenes: Sdl-1, Sdlt-1 o detalle de cuneta: Cnf-1 Diseñar estructura de pavimento	Abatimiento de nivel freático Reducción de humedad, Wnat < 40%

Tabla 21. Matriz de recomendaciones a realizar en subrasantes tipo "B", en función de las condiciones de humedad y flujo

Categoría	Presencia de nivel freático "Wnat" (%)	Presencia de flujo interno	Posibles acciones a realizar	Condición futura esperada
TIPO B	No	Sí	Colocar filtros, detalle: Fil-1 Si: Límite contracción: LC < 10 % y actividad del suelo > 1,25 entonces: 1. Mejorar subrasante con cal Verificar CBR, In situ o ensayo DCP Diseñar estructura de pavimento	Condición de flujo controlada Expansividad del suelo controlada: Actividad del suelo < 1,25
		No	Si: Límite contracción: LC < 10 % y actividad del suelo > 1,25 entonces: 1. Mejorar subrasante con cal Verificar CBR, In situ o ensayo DCP Diseñar estructura de pavimento	Expansividad del suelo controlada: Actividad del suelo < 1,25
	Sí	Sí	Colocar filtros, detalle: Fil-1 Colocar drenes: Sdl-1, Sdlt-1 o detalle de cuneta: Cnf-1 Si: Límite contracción: LC < 10 % y actividad del suelo > 1,25 entonces: 1. Mejorar subrasante con cal	Condición flujo controlada Abatimiento de nivel freático Reducción de humedad, Wnat < 40%

			<p>Verificar CBR, In situ o ensayo DCP</p> <p>Diseñar estructura de pavimento</p>	<p>Expansividad del suelo controlada: Actividad del suelo < 1,25</p>
		No	<p>Colocar drenes: Sdl-1, Sdlt-1 o detalle de cuneta: Cnf-1</p> <p>Si: Límite contracción: LC < 10 % y actividad del suelo > 1,25 entonces:</p> <p>1. Mejorar subrasante con cal</p> <p>Verificar CBR, In situ o ensayo DCP</p> <p>Diseñar estructura de pavimento</p>	<p>Abatimiento de nivel freático</p> <p>Reducción de humedad, Wnat < 40%</p> <p>Expansividad del suelo controlada: Actividad del suelo < 1,25</p>

Tabla 22. Matriz de recomendaciones a realizar en subrasantes tipo "C", en función de las condiciones de humedad y flujo

Categoría	Presencia de nivel freático "Wnat" (%)	Presencia de flujo interno	Posibles acciones a realizar	Condición futura esperada
TIPO C	No	Sí	<p>Colocar filtros, detalle: Fil-1</p> <p>Si: Límite contracción: LC < 10 % y actividad del suelo > 1,25 entonces:</p> <p>1. Mejorar subrasante con cal</p> <p>Como CBR < 4 % entonces:</p>	<p>Condición de flujo controlada</p> <p>Expansividad del suelo controlada: Actividad del suelo < 1,25</p>

			1. Estabilizar subrasante con cemento 2. Reforzar con geogrilla Verificar CBR, In situ o ensayo DCP Diseñar estructura de pavimento	Aumento en capacidad de soporte de subrasante: CBR > 5 %
		No	Si: Límite contracción: LC < 10 % y actividad del suelo > 1,25 entonces: 1. Mejorar subrasante con cal Como CBR < 4 % entonces: 1. Estabilizar subrasante con cemento 2. Reforzar con geogrilla Verificar CBR, In situ o ensayo DCP Diseñar estructura de pavimento	Expansividad del suelo controlada: Actividad del suelo < 1,25 Aumento en capacidad de soporte de subrasante: CBR > 5%
	Sí	Sí	Colocar filtros, detalle: Fil-1 Colocar drenes: Sdl-1, Sdlt-1 o detalle de cuneta: Cnf-1 Si: Límite contracción: LC < 10 % y actividad del suelo > 1,25 entonces:	Condición flujo controlada Abatimiento de nivel freático Reducción de humedad, Wnat < 40%

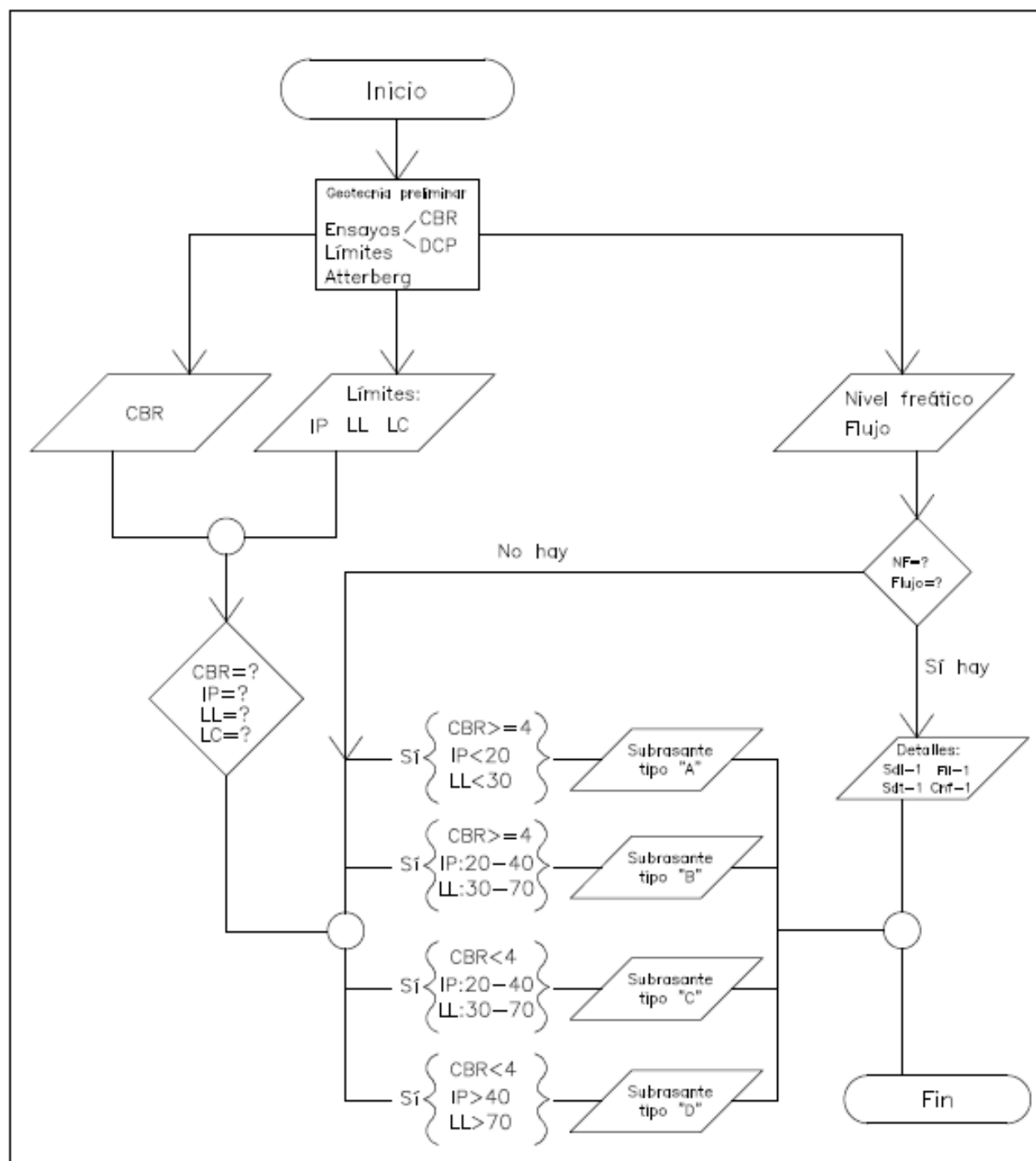
			<p>1. Mejorar subrasante con cal</p> <p>Como CBR < 4 % entonces:</p> <p>1. Estabilizar subrasante con cemento</p> <p>2. Reforzar con geogrilla</p> <p>Verificar CBR, In situ o ensayo DCP</p> <p>Diseñar estructura de pavimento</p>	<p>Expansividad del suelo controlada: Actividad del suelo < 1,25</p> <p>Aumento en capacidad de soporte de subrasante: CBR > 5 %</p>
		No	<p>Colocar drenes: Sdl-1, Sdlt-1 o detalle de cuneta: Cnf-1</p> <p>Si: Límite contracción: LC < 10 % y actividad del suelo > 1,25 entonces:</p> <p>1. Mejorar subrasante con cal</p> <p>Como CBR < 4 % entonces:</p> <p>1. Estabilizar subrasante con cemento</p> <p>2. Reforzar con geogrilla</p> <p>Verificar CBR, In situ o ensayo DCP</p> <p>Diseñar estructura de pavimento</p>	<p>Abatimiento de nivel freático</p> <p>Reducción de humedad, Wnat < 40%</p> <p>Expansividad del suelo controlada: Actividad del suelo < 1,25</p> <p>Aumento en capacidad de soporte de subrasante: CBR > 5 %</p>

Tabla 23. Matriz de recomendaciones a realizar en subrasantes tipo "D", en función de las condiciones de humedad y flujo

Categoría	Presencia de nivel freático "Wnat" (%)	Presencia de flujo interno	Posibles acciones a realizar	Condición futura esperada
TIPO D	No	Sí	<p>Colocar filtros, detalle: Fil-1</p> <p>Como IP > 40 y CBR < 4%, entonces:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sustituir suelo de subrasante 2. Estabilizar y mejorar subrasante con cemento o cal 3. Reforzar con geogrilla <p>Verificar CBR, In situ o ensayo DCP</p> <p>Diseñar estructura de pavimento</p>	<p>Condición de flujo controlada</p> <p>Eliminación o control de suelos expansivos: IP < 20</p> <p>Aumento en capacidad de soporte de subrasante: CBR ≥ 10%</p>
		No	<p>Como IP > 40 y CBR < 4%, entonces:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sustituir suelo de subrasante 2. Estabilizar y mejorar subrasante con cemento o cal 3. Reforzar con geogrilla <p>Verificar CBR, In situ o ensayo DCP</p> <p>Diseñar estructura de pavimento</p>	<p>Eliminación o control de suelos expansivos: IP < 20</p> <p>Aumento en capacidad de soporte de subrasante: CBR ≥ 10%</p>

	Sí	Sí	<p>Colocar filtros, detalle: Fil-1</p> <p>Colocar drenes: Sdl-1, Sdlt-1 o detalle de cuneta: Cnf-1</p> <p>Como IP > 40 y CBR < 4%, entonces:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sustituir suelo de subrasante 2. Estabilizar y mejorar subrasante con cemento o cal 3. Reforzar con geogrilla <p>Verificar CBR, In situ o ensayo DCP</p> <p>Diseñar estructura de pavimento</p>	<p>Condición flujo controlada</p> <p>Abatimiento de nivel freático</p> <p>Reducción de humedad, Wnat < 40%</p> <p>Eliminación o control de suelos expansivos: IP < 20</p> <p>Aumento en capacidad de soporte de subrasante: CBR ≥ 10%</p>
		No	<p>Colocar drenes: Sdl-1, Sdlt-1 o detalle de cuneta: Cnf-1</p> <p>Como IP > 40 y CBR < 4%, entonces:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sustituir suelo de subrasante 2. Estabilizar y mejorar subrasante con cemento o cal 3. Reforzar con geogrilla <p>Verificar CBR, In situ o ensayo DCP</p> <p>Diseñar estructura de pavimento</p>	<p>Abatimiento de nivel freático</p> <p>Reducción de humedad, Wnat < 40%</p> <p>Eliminación o control de suelos expansivos: IP < 20</p> <p>Aumento en capacidad de soporte de subrasante: CBR ≥ 10%</p>

Gráfico 10. Flujograma para categorización de las subrasantes, con base en las matrices elaboradas



Resumen de estructuras de pavimentos para uso del usuario

A continuación se presenta la tabla resumen de todos los diseños tipo, en ésta el usuario puede seleccionar las posibles estructuras de

pavimentos para una condición determinada, y a su vez compararlas y determinar cuál podría ser la más conveniente desde el punto de vista técnico y de costos. Más adelante se describirán los espesores de capa para cada una de las simbologías indicadas en la siguiente tabla:

TABLA 24. RESUMEN DE SELECCIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS							
		ESAL's					
		5,00E+05		1,00E+06		5,00E+06	
CBR	≤ 4	FC-1	FTSB-1	FC-2	FTSB-2	FC-3	FTSB-3
		SMC-1	STSB-1	SMC-2	STSB-2	SMC-3	STSB-3
		AD-1	RIG-1	AD-2	RIG-2	AD-3	RIG-3
	5-9	FC-4	FTSB-4	FC-5	FTSB-5	FC-6	FTSB-6
		SMC-4	STSB-4	SMC-5	STSB-5	SMC-6	STSB-6
		AD-4	RIG-4	AD-5	RIG-5	AD-6	RIG-6
	≥ 10	FC-7	FTSB-7	FC-8	FTSB-8	FC-9	FTSB-9
		SMC-7	STSB-7	SMC-8	STSB-8	SMC-9	STSB-9
		AD-7	RIG-7	AD-8	RIG-8	AD-9	RIG-9

Diseños tipo de las estructuras de pavimentos

A continuación se presentan los espesores de capas de cada una de las estructuras de pavimentos que se utilizaron en el presente proyecto:

Gráfico 11. Detalle tipo para pavimento flexible con carpeta "FC"

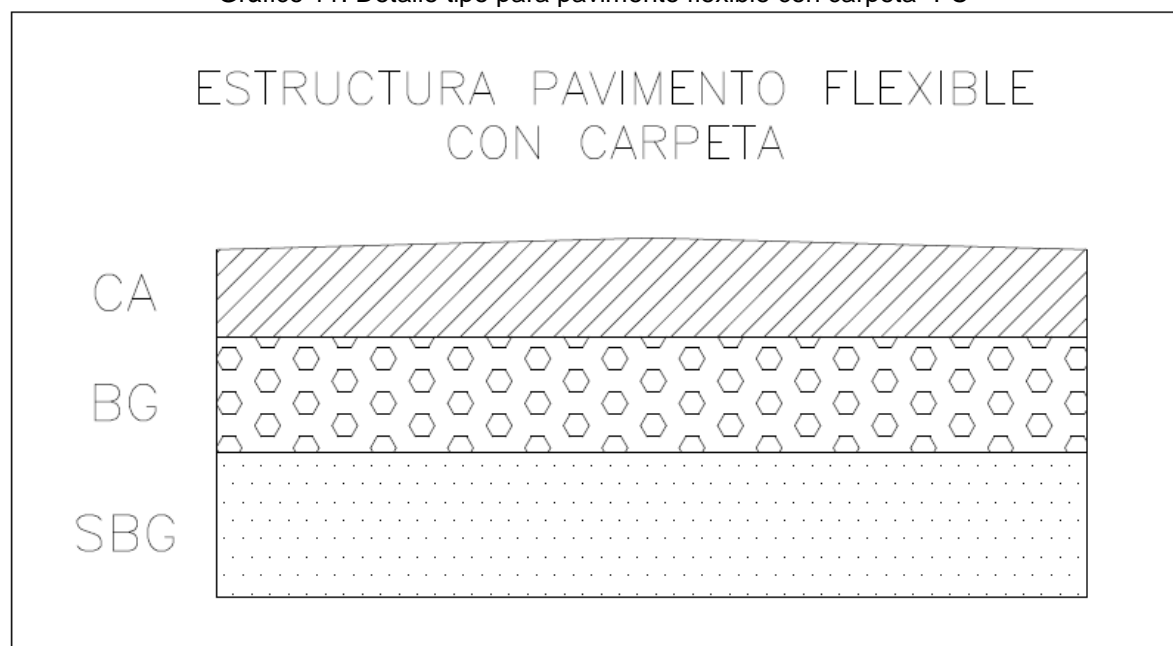


Tabla 25. Espesores para estructura de pavimento flexible con carpeta (FC)				
Paquete estructural	Esals del periodo de diseño (N) →	5,00E+05	1,00E+06	5,00E+06
	CBR ↓	Dimensiones (cm)		
Tipo →		FC-1	FC-2	FC-3
CA	≤ 4	11	13	16
BG		15	15	15
SBG		15	15	26
Tipo →		FC-4	FC-5	FC-6
CA	5-9	11	13	16
BG		16	15	15
SBG		-	-	10
Tipo →		FC-7	FC-8	FC-9
CA	≥ 10	11	11	11
BG		10	10	12
SBG		-	-	-

CA: Carpeta asfáltica
BG: Base granular
SBG: subbase granular

Gráfico 12. Detalle tipo para pavimento flexible con riego superficial "FTSB"



Tabla 26. Espesores para estructura de pavimento flexible con riego superficial (FTSB)				
Paquete estructural	Esals del periodo de diseño (N)	5,00E+05	1,00E+06	5,00E+06
	CBR	Dimensiones (cm)		
Tipo		FTSB-1	FTSB-2	FTSB-3
TSB	≤ 4	-	-	-
BG		40	45	50
SBG		30	30	45
Tipo		FTSB-4	FTSB-5	FTSB-6
TSB	5-9	-	-	-
BG		30	40	45
SBG		25	20	35
Tipo		FTSB-7	FTSB-8	FTSB-9
TSB	≥ 10	-	-	-
BG		20	20	30
SBG		15	20	20

TSB: Tratamiento superficial bituminoso

BG: Base granular

SBG: subbase granular

Gráfico 13. Detalle tipo para pavimento semirrígido con carpeta "SMC"

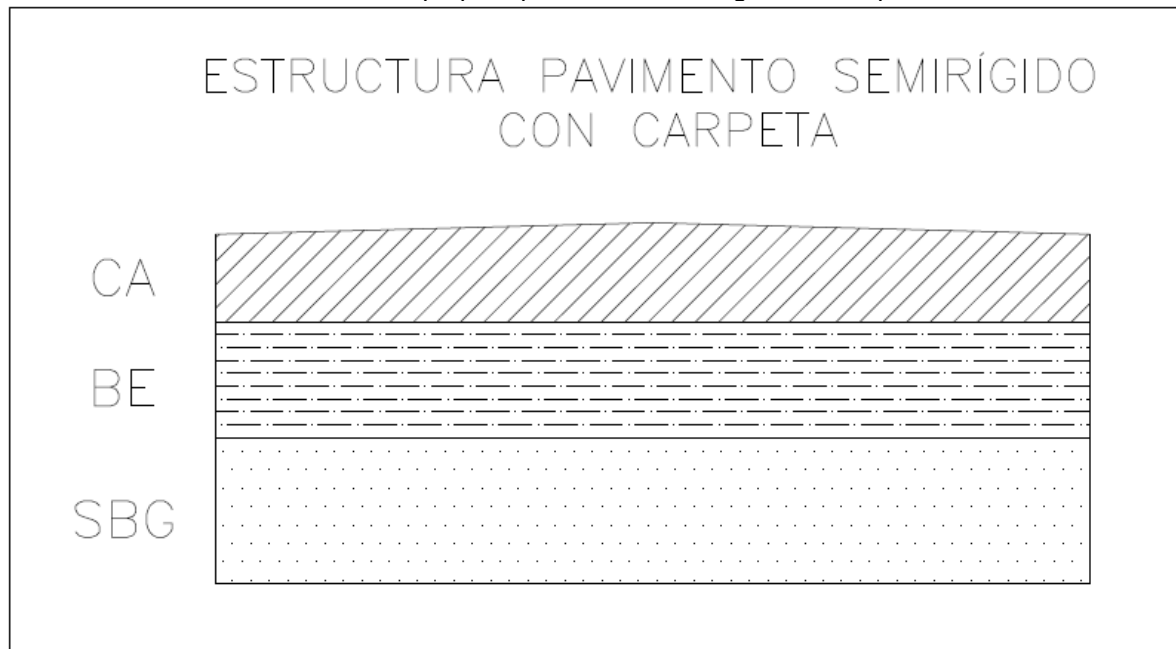







Tabla 27. Espesores para estructuras de pavimentos semirígidos con carpeta (SMC)				
Paquete estructural	Esals del periodo de diseño (N)	5,00E+05	1,00E+06	5,00E+06
	CBR	Dimensiones (cm)		
Tipo		SMC-1	SMC-2	SMC-3
CA	≤ 4	6,5	7,5	9
BE		17	18	25
SBG		20	23	27
Tipo		SMC-4	SMC-5	SMC-6
CA	5-9	6,5	7,5	9
BE		15	15	25
SBG		10	13	10
Tipo		SMC-7	SMC-8	SMC-9
CA	≥ 10	6,5	7	9
BE		10	12	15
SBG		-	-	-

CA: Carpeta asfáltica
BE: Base estabilizada con cemento
SBG: subbase granular

Gráfico 14. Detalle tipo para pavimento semirrígido con riego superficial "STSB"



Tabla 28. Espesores para estructura de pavimento semirígido con riego superficial (STSB)				
Paquete estructural	Esals del periodo de diseño (N) 	5,00E+05	1,00E+06	5,00E+06
	CBR 	Dimensiones (cm)		
Tipo 		STSB-1	STSB-2	STSB-3
TSB	≤ 4	-	-	-
BE		30	35	45
SBG		25	22	27
Tipo 		STSB-4	STSB-5	STSB-6
TSB	5-9	-	-	-
BE		25	25	35
SBG		18	25	26
Tipo 		STSB-7	STSB-8	STSB-9
TSB	≥ 10	-	-	-
BE		12	15	25
SBG		17	17	12

TSB: Tratamiento superficial bituminoso

BE: Base estabilizada con cemento

SBG: subbase granular

Gráfico 15. Detalle tipo para pavimento articulado con adoquines "AD"

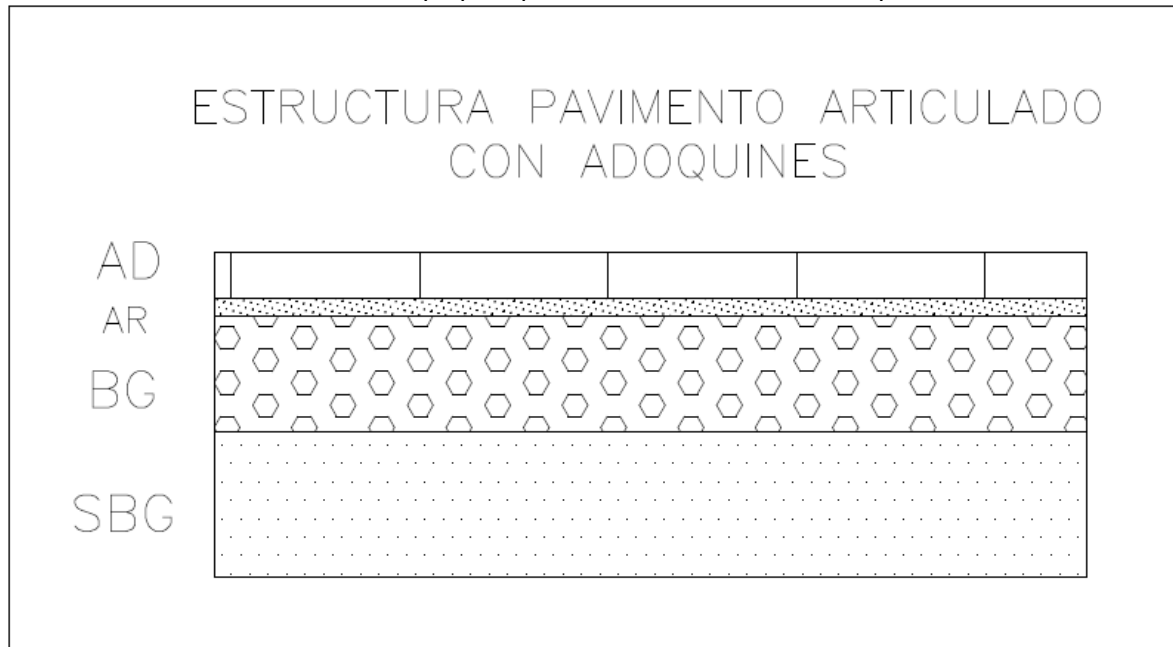







Tabla 29. Espesores para estructuras de pavimentos articulados de adoquines (AD)

Paquete estructural	Esals del periodo de diseño (N) 	5,00E+05	1,00E+06	5,00E+06
	CBR 	Dimensiones (cm)		
Tipo 		AD-1	AD-2	AD-3
Adoquín + arena	≤ 4	10,5	10,5	10,5
BG		10	15	30
SBG		20	23	30
Tipo 		AD-4	AD-5	AD-6
Adoquín + arena	5-9	10,5	10,5	10,5
BG		10	15	30
SBG		7	8	10
Tipo 		AD-7	AD-8	AD-9
Adoquín + arena	≥ 10	10,5	10,5	10,5
BG		10	15	30
SBG		-	-	-






AD: Adoquín de concreto, 8 cm espesor, AR: Cama de arena de asiento

BG: Base granular

SBG: subbase granular

Gráfico 16. Detalle tipo para pavimento rígido "RIG"



Tabla 30. Espesores para estructuras de pavimentos rígidos (RIG)				
Paquete estructural	Esals del periodo de diseño (N) 	5,00E+05	1,00E+06	5,00E+06
	CBR 	Dimensiones (cm)		
Tipo 		RIG-1	RIG-2	RIG-3
Losa	≤ 4	12	15	20
SBG		15	15	15
Tipo 		RIG-4	RIG-5	RIG-6
Losa	5-9	10	13	19
SBG		15	15	15
Tipo 		RIG-7	RIG-8	RIG-9
Losa	≥ 10	-	-	-
SBG		-	-	-

SBG: subbase granular

Herramienta de control de variables utilizada

A continuación se muestra mediante la aplicación de un ejemplo el uso de la herramienta. Se presenta el análisis para un diseño tipo que se presentó en el apartado anterior. Se utilizó como base el diseño de la tabla 23, para una estructura de pavimento flexible con carpeta, con $\text{CBR} \leq 4\%$, un valor de ejes equivalentes para el periodo de diseño (N) de hasta 5E06.

Se presentan las variables teóricas que serían las que se introducen para el año 0 y las variables reales que serían las que se introducen

a partir del año 1 hasta el último año del periodo de diseño, en este caso el año 10.

En cuanto a las memorias de cálculo, en el apartado de "apéndices", se presenta la memoria de cálculo completa para el ejemplo que se mencionó. En esta se presenta la herramienta completa en donde se introducen los datos de las variables, el cálculo de los ejes equivalentes, el cálculo del CBR representativo por unidad de diseño mediante el percentil, la memoria de cálculo de diseño de pavimento flexible, cálculo de deformación horizontal y cálculo de deformación por fatiga. Por lo que para este objetivo se presentará solamente el resumen de los datos y la gráfica final que corresponde a la comparación entre las dos curvas:

TABLA 31. CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO TEÓRICOS (EJEMPLO)						
	DISTRIBUCION VEHICULAR					Año 0
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	592	137	273	111	65	124
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	45,5%	10,5%	21,0%	8,5%	5,0%	9,5%
% VEHÍCULOS PESADOS	14,5%					

TABLA 32. RESUMEN DATOS TEÓRICOS	
DATOS TEÓRICOS	AÑO 0
TPD	1300
Periodo de Diseño	10
Tasa de crecimiento "i" teórica	3%
Factor Dirección	0,5
Factor Carril	1

La siguiente sería la ecuación para el cálculo de los ejes equivalentes teóricos para el diseño del pavimento:

$$N = N0 * FD * FC * 365 * \frac{(1 + i)^n - 1}{i}$$

Para el caso de este ejemplo los ejes equivalentes teóricos de diseño serían de:

$$N = 5080898 \text{ Esals}$$

TABLA 33. PROYECCIÓN TEÓRICA DE TRÁNSITO DURANTE EL PERIODO DE DISEÑO				
N° Año	Año	TPD	ESALS	ESALS Acumulados
T0	2017	1300		
T1	2018	1339	443209	443209
T2	2019	1379	456506	899715
T3	2020	1421	470201	1369916
T4	2021	1463	484307	1854223
T5	2022	1507	498836	2353059
T6	2023	1552	513801	2866860
T7	2024	1599	529215	3396075
T8	2025	1647	545092	3941166
T9	2026	1696	561444	4502611
T10	2027	1747	578288	5080898

Las siguientes tablas muestran el resumen de los datos de los conteos anuales de los vehículos y su distribución durante el periodo de diseño, para un ejemplo hipotético:

TABLA 34. DATOS REALES DE TRÁNSITO DURANTE EL PERIODO DE DISEÑO					
RESUMEN DATOS REALES	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
TPD (conteo)	1418	1493	1644	1728	1808
Tasa de crecimiento "i" real	9%	5%	10%	5%	5%
Factor Dirección	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Factor Carril	1	1	1	1	1
DATOS REALES	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
TPD (conteo)	1904	2000	2055	2157	2265
Tasa de crecimiento "i" real	5%	5%	3%	5%	5%
Factor Dirección	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Factor Carril	1	1	1	1	1

TABLA 35. COMPORTAMIENTO REAL DEL TRÁNSITO DURANTE EL PERIODO DE DISEÑO				
N° Año	Año	TPD	ESALS	ESALS Acumulados
T0	2017	1300		
T1	2018	1418	469466	469466
T2	2019	1493	494266	963732
T3	2020	1644	544164	1507896
T4	2021	1728	571968	2079865
T5	2022	1808	598531	2678396
T6	2023	1904	630224	3308621
T7	2024	2000	662067	3970687
T8	2025	2055	680201	4650889
T9	2026	2157	713806	5364695
T10	2027	2265	749823	6114518

Por lo tanto, los ejes equivalentes reales del periodo de diseño son:

6,11E+06

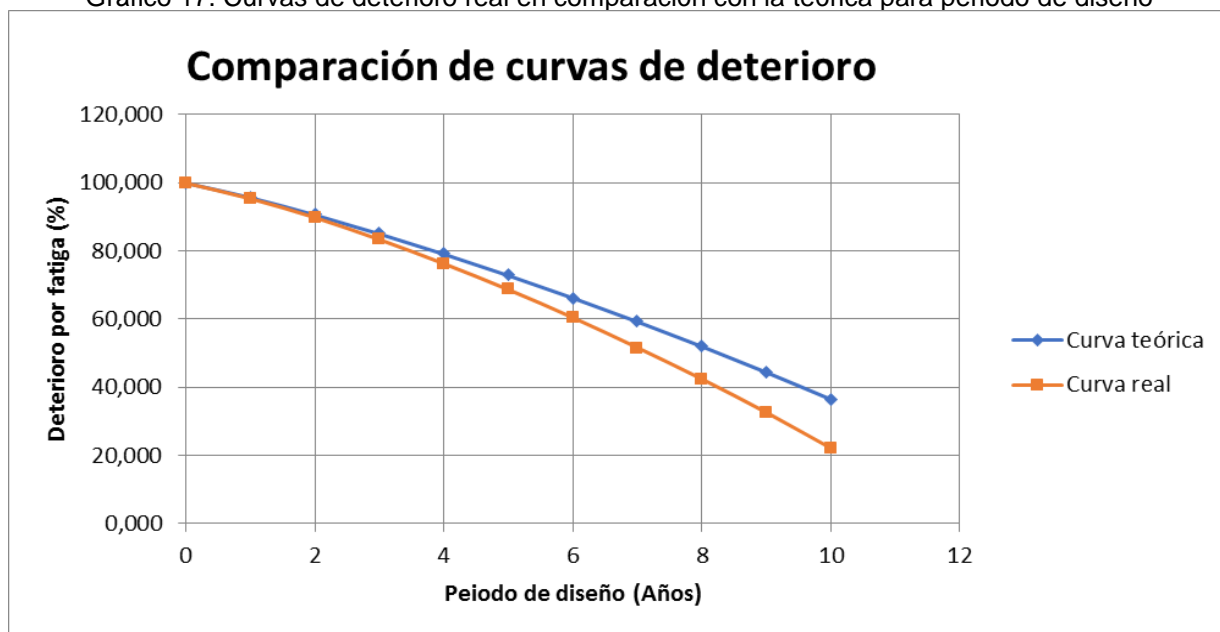
Las siguientes tablas muestran el avance porcentual del deterioro por fatiga para cada uno de los escenarios, el teórico y el real:

TABLA 36. DATOS DE CURVA DE DETERIORO TEÓRICO					
Año	N	DETERIORO POR FATIGA di	SUMAT di	DETERIORO POR FATIGA DE MENOS A MÁS (%)	AGRIETAMIENTO DE FATIGA ABAJO A ARRIBA (%)
0				100,000	0
1	443209	0,0000183	0,0000183	95,704	4,296
2	456506	0,0000189	0,0000372	90,605	9,395
3	470201	0,0000194	0,0000566	85,049	14,951
4	484307	0,0000200	0,0000766	79,110	20,890
5	498836	0,0000206	0,0000972	72,819	27,181
6	513801	0,0000212	0,0001185	66,191	33,809
7	529215	0,0000219	0,0001404	59,233	40,767
8	545092	0,0000225	0,0001629	51,946	48,054
9	561444	0,0000232	0,0001861	44,330	55,670
10	578288	0,0000239	0,0002100	36,381	63,619
Total Esal's	5080898	0,0002100			

TABLA 37. DATOS DE CURVA DE DETERIORO REAL					
Año	N	DETERIORO POR FATIGA di	SUMAT di	DETERIORO POR FATIGA DE MENOS A MÁS	AGRIETAMIENTO DE FATIGA ABAJO A ARRIBA
0				100,000	0
1	469466	0,0000194	0,0000194	95,422	4,578
2	494266	0,0000204	0,0000398	89,864	10,136
3	544164	0,0000225	0,0000623	83,377	16,623
4	571968	0,0000236	0,0000860	76,284	23,716
5	598531	0,0000247	0,0001107	68,638	31,362
6	630224	0,0000260	0,0001367	60,391	39,609
7	662067	0,0000274	0,0001641	51,548	48,452
8	680201	0,0000281	0,0001922	42,301	57,699
9	713806	0,0000295	0,0002217	32,445	67,555
10	749823	0,0000310	0,0002527	21,944	78,056
Total Esal's	6114518	0,0002527			

La siguiente gráfica muestra la comparación del comportamiento del deterioro teórico frente al real:

Gráfico 17. Curvas de deterioro real en comparación con la teórica para periodo de diseño



Análisis de los resultados

A continuación se presenta el análisis de los resultados del proyecto, en orden cronológico desde los objetivos que se plantearon y tomando como base los resultados que se presentaron:

Para el caso del objetivo de propuesta de detalles tipo para los principales elementos de los sistemas de drenajes, se puede apreciar en las tablas 14 y 15, para el caso de las cunetas, que entre más grande sea la pendiente del camino menor será el espaciamiento para los elementos disipadores de energía por la velocidad erosiva del agua. Caso contrario ocurre con la capacidad hidráulica, la cual aumenta con la pendiente. A partir del 10 % de pendiente longitudinal de la vía la velocidad se vuelve erosiva y se requiere cortar el caudal o colocar aliviaderos u otro dispositivo, para evitar daños en las superficies de la cuneta, comparando este dato con el propuesto por “Gordon Keller y James Sherar, de Ingeniería de caminos Rurales”, en donde se estandariza un espaciamiento de 30 m máximo para suelos erosionables y de 50 m para suelos poco erosionables a partir del 12 % de pendiente. Se puede determinar que para el presente proyecto ese valor es diferente ya que según los cálculos que se realizaron a partir del 10 % ya se cuenta con la erosionabilidad del suelo y de la superficie revestida en el caso de cunetas revestidas, además los espaciamientos son variables ya que hay que tomar en cuenta la capacidad hidráulica del elemento seleccionado. A mayor capacidad hidráulica mayor será la longitud erosiva, esto tiene sentido ya que los elementos de mayor capacidad cuentan con un mayor espejo de agua lo que significa un área de contacto mayor para la circulación del agua, lo que beneficia este aspecto. Sin embargo, para esta investigación se obtuvieron valores de espaciamientos entre los 25 m y los 66 m a partir del 10 % de pendiente, para las cunetas de tierra al considerar una velocidad erosiva de 0,90 m/s.

Para el caso de las alcantarillas, se observó que al aplicar las herramientas a un ejemplo en concreto se pudo visualizar cómo se

cuenta con diferentes opciones para captar el caudal requerido, en estas el diseñador puede comparar las diferentes posibilidades a utilizar en su diseño, considerando aspectos de costos, técnicos y hasta geometría, ya que hay elementos que por su forma permiten el paso de escombros en el arrastre de los cauces sin generar tapones que puedan producir daños a las estructuras. Por ejemplo, si se determina para un caso concreto que tanto una alcantarilla circular como una de cuadro cumplen desde el punto de vista hidráulico y que la circular es más económica, el diseñador podría considerar que dicho elemento es más riesgoso para el paso de escombros durante una avenida o cabeza de agua, por lo que podría por aspectos de seguridad utilizar la de cuadro, ya que esta por su forma beneficia más el paso de escombros.

También es necesario que se considere, para efectos de escogencia de la alcantarilla final, el diseño por control de entrada y salida de la AASHTO, ya que estos elementos no se comportan como canales rectos, sino que presentan diferentes condiciones para el transporte del caudal. Para efectos del presente proyecto los elementos que se propusieron sirven como diseño inicial para posteriormente realizar este análisis, ya que para aplicar esta metodología se debe evaluar cada caso en específico.

Para los subdrenajes, se propusieron diversos detalles tipos para diferentes condiciones, tanto para flujo interno por ascensión capilar como para nivel freático. En este apartado se pueden utilizar tanto drenes como filtros tipo “francés” o cunetas ondas. Para abatir el nivel freático la solución de cunetas ondas es una alternativa más económica y rápida, más si la vía es de lastre, permitiría un ahorro considerado en la colocación de drenes. Sin embargo, si se utiliza esta opción hay que considerar el mantenimiento de la misma. Si se utilizara como cuneta revestida se requiere de la

colocación de orificios espaciados adecuadamente para el paso del agua.

En el área del análisis de la subrasante se presentaron las matrices de categorización y de acciones y recomendaciones para la evaluación y tratamiento de la misma durante la fase de planeamiento y diseño de un proyecto vial, además se presenta un flujograma que resume la aplicación de estas herramientas. En cuanto a este apartado se puede apreciar que la categorización se resume en 4 elementos según la tabla 18. Para la creación de las categorías se consideraron aspectos geotécnicos como la capacidad soportante (CBR), tipos de suelo, condiciones de humedad natural relacionada a la presencia de nivel freático o flujo interno y propiedades físicas como los límites de Atterberg. Esta categorización se basó en el estudio y análisis de varios informes de laboratorios de proyectos e información bibliográfica estudiada, la cual podría no necesariamente coincidir con alguna condición específica de algún proyecto, para este caso la misma sirve de guía y es necesario que se cuente con la mayor cantidad de estudios posibles para determinar la eficacia de la misma. En las tablas 19, 20, 21 22, se propusieron una serie de acciones a realizar para cada categoría, entre ellas se incluye la necesidad de verificar el CBR de la subrasante solo cuando la misma se vaya a alterar.

También cuando se presentan acciones relacionadas a la utilización de los detalles tipo de los sistemas de subdrenaje, como por ejemplo si se contara con la presencia de nivel freático, la guía recomienda la utilización de los detalles tipo de drenes o el de la cuneta onda, con una profundidad de 70 cm y como consecuencia a esta acción se genera una “condición futura esperada” que para el presente proyecto consiste en: abatir el nivel freático y reducir la humedad natural del suelo (%Wnat) por debajo del 40 % como máximo recomendado.

En cuanto a la presencia de suelos peligrosos por posible expansividad de suelos familias de las arcillas, el diseñador cuenta con la posibilidad de analizar varias acciones, como: sustituir suelos, estabilizar o mejorar la subrasante con cemento o cal o reforzar con geotextiles tipo “geogrilla”. Nuevamente el diseñador debe tomar decisiones con base en aspectos de costos, técnicos o de seguridad.

Para la determinación de los materiales y los tipos de estructuras de pavimentos a utilizar,

se propusieron los establecidos por el CR-2010, en cuanto a bases, subbases, asfalto, concreto, adoquines y tratamientos superficiales, así como el cemento como material estabilizador. Se debe aclarar que el cemento es un excelente estabilizador cuando se cuenta con poca capacidad de soporte, pero se debe tomar en cuenta que un exceso en la cantidad del mismo puede producir agrietamientos prematuros en las bases y que posteriormente se verán reflejados en la capa superficial. Para el caso de materiales de alta expansividad es preferible mejorar con cal, ya que la cal es un material más adecuado para tratar la expansividad y los cambios volumétricos de los suelos. Se debe tomar en cuenta que para la realización de los diseños se utilizaron los valores teóricos de las propiedades de los materiales según el CR-2010 y los catálogos de los productos, pero el diseñador debe realizar los ensayos requeridos para obtener las propiedades reales y utilizarlos para obtener un diseño más fidedigno.

Para el análisis de la variable tránsito se consideraron para efectos de los diseños tipo, tres volúmenes los cuales se consideran adecuados ya que son los más comunes dentro de los caminos vecinales y son los más frecuentes en caminos de lastre. Sin embargo es importante recalcar las debilidades con que cuenta el régimen municipal en materia de conteos vehiculares e implementación de las estaciones de pesaje, para la obtención de factores camión reales y prevenir el deterioro prematuro de las vías, ya que según encuestas de carga realizadas por LANAMME y al comparar los factores camión obtenidos en Costa Rica con respecto a los de otros países desarrollados, se puede determinar que en donde se cuenta con estaciones de pesaje los factores camión se reducen considerablemente.

Para el diseño de las estructuras de pavimentos se generaron diseños tipo para seis estructuras de pavimentos los cuales se presentan en las tablas 20 a la 25, con condiciones de tránsito y CBR variable. Como es lógico se puede determinar que los espesores de capa se reducen a mayor CBR y menor tránsito, sin embargo al contar con varias estructuras para estas condiciones se entra en el dilema de qué estructura utilizar. Para este caso el diseñador deberá considerar aspectos económicos como: el valor actual de costos, el cual considera el costo de la inversión inicial o sea el costo del proyecto,

más el costo del mantenimiento y la vida útil de la estructura y comparar entre las diversas posibilidades, así como tomar en cuenta la relación beneficio/costo y la disponibilidad en el mercado y en la zona de los materiales a utilizar.

La utilización de estos espesores es una guía muy útil y práctica para la toma de decisiones y el cálculo de presupuesto de obra, pero no siempre se deben utilizar directamente, lo más recomendable es verificarlos mediante un análisis de fatiga y deformación permanente, caso que para este proyecto solo se realizó un análisis de fatiga para el ejemplo que se muestra en el apéndice.

En cuanto a los criterios mecanísticos-empíricos, se hizo el análisis por fatiga en la que se obtuvo el valor de la deformación horizontal “ ϵ ” en la base de la carpeta utilizando la teoría de multicapa elástica para el ejemplo que se utilizó y luego al aplicar la metodología establecida en la publicación: LM-PI-GM-INF-22-14, de LANAMME, se pudo predecir el comportamiento del deterioro estructural por agrietamiento de fatiga en la estructura de pavimento. Para el ejemplo se diseñó para 5,00E+06 ejes equivalentes, lo que significa que su umbral de falla corresponde al 50 % de agrietamiento máximo de la huella vehicular. A continuación los umbrales establecidos por LANAMME:

Ejes equivalentes periodo de diseño	Porcentaje de área agrietada antes de la falla
< 3 millones	75 %
3 - 15 millones	50 %
> 15 millones	20 %

Figura 50. Umbrales de falla por fatiga para diferentes volúmenes de tránsito (Fuente: Publicación: LM-PI-GM-INF-22-14. LANAMME).

Como se puede observar en la tabla 34, el 50 % máximo se alcanza en el año 8, el cual aparece coloreado de amarillo, lo cual indica que ese diseño tipo bajo las condiciones presentadas y las proyecciones teóricas del tránsito establecido, no estaría cumpliendo con el desempeño deseado para el periodo de diseño meta, que sería el de los 10 años. Es aquí donde el diseñador puede afinar más el diseño original que obtuvo por parte de la AASHTO y tomar decisiones de si aumentar los espesores, mejorar las propiedades de los materiales que se utilizaron o plantear una rehabilitación dentro del periodo de diseño para ese año, el cual podría

ser un recarpeteo para elevar nuevamente la curva de deterioro.

Para el caso de la herramienta para el control de la variable del tránsito, paralelamente al cálculo teórico del tránsito de diseño, se pueden introducir los datos reales de conteos vehiculares y sus respectivos factores camión y calcular variables reales de interés como la tasa de crecimiento vehicular real, el porcentaje de vehículos pesados reales, TDP, entre otras. Como se puede observar para el ejemplo según la tabla 30, se utilizó una tasa de crecimiento vehicular teórica “i” del 3 %, mientras que a la hora de introducir los datos reales de los vehículos que pasan por la vía, se obtuvieron para cada año tasas variables, como se puede observar en la tabla 32, en la cual se calcularon tasas vehiculares de 5 %, 9 %, 10 %, 3 %, etc. Para efectos del ejemplo, esto muestra variaciones considerables, lo que significa que el volumen de tránsito real supera al teórico calculado para el diseño, esto tiene como consecuencia un aceleramiento prematuro en el deterioro de la vía.

Como se puede observar en la gráfica 17, en donde se compara el deterioro de la curva para tránsito teórico frente a la de tránsito real, se observa que el deterioro de la real es mayor, incluso el umbral de falla de 50 % de agrietamiento se logra al año 7, el cual se puede observar en la tabla 35 coloreado de amarillo.

Al contarse con este control se pueden tomar en cuenta motivos por los que se produce el deterioro. Así como tomar las medidas respectivas del caso, las cuales podrían ser: mejorar el mantenimiento de las vías, determinar si los factores camión de los vehículos pesados son muy elevados mediante la implementación de estaciones de peaje (lo cual es muy difícil de lograr) o si se requiere adelantar la rehabilitación programada para evitar un daño estructural mayor.

A su vez estos datos permiten generar bases de datos para futuros diseños y contar con información más fundamentada.

Conclusiones

Como principales conclusiones se pueden mencionar las siguientes:

1. Se logró obtener una guía técnica de diseños tipo para las diversas áreas de la ingeniería vial, entre ellas: Los principales elementos del sistema de drenajes (alcantarillas, cunetas y subdrenajes), recomendaciones para la categorización y evaluación de la subrasante, diseños tipo para seis tipos de estructuras de pavimentos, y una herramienta de control de variables principalmente de tránsito para la predicción y comparación del deterioro progresivo real del camino contra el deterioro teórico por fatiga.
2. En el área de drenajes, para las cunetas se obtuvieron diseños tipo para soluciones; ya sean revestidas de concreto, en superficie de tierra y para el control del nivel freático. En dichos diseños se obtuvieron las longitudes máximas para corte de aguas con el fin de evitar daños en la superficie por erosión, dichas longitudes se obtuvieron en función de las pendientes de la vía y el caudal.
3. En el caso de las alcantarillas, se definieron detalles tipo para alcantarillas circulares de concreto para los diámetros comerciales menores e igual y mayores a 1,20m, además de los detalles tipo para alcantarillas tipo bóveda o de cuadro; para los cuales se obtuvieron sus capacidades máximas hidráulicas, tanto para una, dos y tres filas, lo cual permitirá comparar las diversas alternativas de soluciones tomando en cuenta aspectos técnicos y de costos. Dichas capacidades se obtuvieron en función de parámetros como la pendiente longitudinal del paso de alcantarilla y el área tributaria de la cuenca a drenar.
4. Para los subdrenajes, se definieron detalles tipo para tres categorías: Longitudinales, transversales y filtro tipo “francés” para flujo subsuperficial. Dichos subdrenajes se diseñan en función de los caudales de nivel freático, de infiltración y de la permeabilidad “k” del suelo de la subrasante existente.
5. Se establecieron tres volúmenes de tránsito en ejes equivalentes por periodo de diseño y por carril de diseño para el cálculo de los espesores de capas, los cuales correspondieron: Primero se definió un T1 de 500 000 Esals, el cual es considerado por la AASHTO como un umbral para caminos de bajo volumen de tránsito y del cual un 10% corresponde a vehículos pesados. Segundo se definió un T2 de 1 000 000 Esals el cual por recomendación del profesor asesor y con base en consultas bibliográficas se considera un tránsito adecuado para caminos vecinales que conectan zonas productivas agrícolas y ganaderas. Y tercero se definió un T3 de 5 000 000 Esals el cual es un volumen bastante alto ya que generalmente al mejorar una vía de lastre a asfalto se puede generar un tránsito atraído que podría llegar a incrementarse incluso a más de 100% del volumen original, ya que este camino podría ser un atajo o crear un desarrollo inmobiliario importante debido a su mejoría.
6. Se determinaron las principales propiedades mecánicas de los materiales más comunes a utilizar en la construcción de estructuras de pavimentos, dichas

propiedades corresponden a: módulo dinámico del mezcla asfáltica en caliente de capetas, módulos de resiliencia de bases granulares y estabilizadas, módulos de resiliencia de subbases granulares, CBRs de capas granulares, resistencia a la comprensión inconfiada a los 7 días de edad de bases estabilizadas con cemento Portland, módulo de ruptura de concreto hidráulico y adoquines, y módulo de poisson “ μ ” de todos los materiales.

7. Para el área de trabajo relacionada con el estudio de la subrasante se diseñaron dos matrices, la primera categoriza la subrasante en cuatro categorías: A, B, C y D; las cuales se clasificaron en función de los tipos de suelo según la carta de plasticidad de Casa Grande, rangos de CBR para subrasantes débiles y potencial de expansividad el cual se determina mediante los límites de Atterberg. En la segunda matriz se definió para cada categoría y dependiendo de la presencia o no de nivel freático y flujo subsuperficial, una serie de acciones a realizar previo a la colocación de la superficie de rodadura, como por ejemplo la colocación de filtros, sustitución de suelos, reforzamiento con geogrillas, estabilización y mejoramiento de subrasante con cemento y cal, etc. Definidas las acciones a realizar finalmente se presenta la condición futura esperada la cual permitiría realizar el mejoramiento del camino de manera segura.
8. Se diseñó un flujograma de procesos para la categorización de la subrasante, el cual muestra de manera gráfica y resumida el uso de la matriz, de esta manera se puede comprender de una manera más sencilla su uso.
9. Para el diseño de pavimentos de definieron seis tipos de estructuras de pavimentos los cuales corresponden a los más utilizados en caminos municipales, de estas seis estructuras se diseñaron paquetes de espesores de capas para los diferentes volúmenes de

tránsito definidos anteriormente y para valores de CBR variables, los cuales se utilizaron tres valores: Mayor e igual que 4, el cual corresponde a subrasantes débiles, en un intervalo entre 5 y 9 en el que ronda los valores más comunes encontrados, y mayor e igual que 10, el cual es la condición futura esperada posteriormente a una estabilización, sustitución o reforzamiento con geogrilla. Una vez definidos estos valores se diseñaron 9 paquetes de espesores por estructura para un total de 54 diseños, para los cuales se cuenta con sus respectivas memorias de cálculo para cada uno.

10. Finalmente se elaboró una herramienta de control de la variable tránsito y de la tasa de crecimiento vehicular con el fin de ir documentado valores reales de tránsitos y que se puedan ir documentando en los expedientes de caminos. Además dicha herramienta permite ir comparando anualmente el comportamiento del deterioro por fatiga em función del tránsito real versus el deterioro por fatiga del tránsito teórico e ir viendo las variaciones para efectos de tomar decisiones, como por ejemplo si el tránsito real es muy alto con respecto al teórico habría que considerar una rehabilitación de la estructura antes del cumplimiento de su periodo de diseño, como por ejemplo un recarpeteo. Dicha predicción del deterioro por fatiga se realizó según la publicación de LANAMME-UCR para el diseño de pavimentos flexibles incorporando criterios mecanísticos empíricos. Para el caso de desarrollo del presente proyecto se utilizó un ejemplo para ilustrar el uso de la herramienta.

Recomendaciones

Para el caso de las recomendaciones y tomando en consideración el análisis de resultados y las conclusiones, se pueden mencionar las siguientes, a la luz de los datos obtenidos:

1. En el área de los drenajes se recomienda, para el diseño y construcción de cunetas, colocar elementos disipadores de energía a la distancia diseñada cuando la pendiente longitudinal supere el 10 %, se recomienda que estos elementos puedan ser como diques, empedrados, aliviaderos o si fuese posible colocar un paso de alcantarilla, lo que produciría una reducción del caudal y a la vez la posibilidad de seleccionar una sección más pequeña y económica.
2. Se recomienda para el diseño de alcantarillas, posterior a la selección del elemento por capacidad hidráulica, revisar dicha sección mediante un análisis por control de entrada y salida que establece la AASHTO. Esto debido a que los sistemas de drenajes en carreteras no se comportan como los canales agrícolas que se construyen en línea recta, sino que el flujo tiene que hacer un recorrido más complejo, desde su transporte desde la cuneta, la entrada a la toma o cabezal de entrada, su recorrido interno por la alcantarilla el cual puede generar un salto hidráulico, hasta su salida, la cual puede presentar diversas condiciones, es por esto que en drenajes de carreteras los principios de hidráulica de canales no son 100 % efectivos. Para la elaboración de este proyecto no se consideró este análisis, pues para poder realizarlo se requiere de una evaluación muy específica de cada caso en concreto.
3. Como alternativa a la utilización de drenes o filtros para el control del nivel freático, se recomienda utilizar una cuneta onda con una profundidad mínima de 70 cm, la cual puede resultar muy efectiva y económica. Si se fuera a realizar en lastre se debe tomar en cuenta el mantenimiento adecuado a fin de que la misma no se obstruya y cuando se construyan revestidas se deben dejar orificios para el drenaje. Sin embargo hay que tomar en cuenta la peligrosidad de la utilización de cunetas cuyas geometrías puedan ocasionar que un vehículo quede atascado y ponga en riesgo la seguridad de sus ocupantes, ante este hecho sería interesante considerar este aspecto a la hora de decidir que detalle utilizar.
4. En el caso de la evaluación correcta de la subrasante se recomienda como mínimo en la medida de lo posible realizar una geotecnia preliminar para determinar las propiedades físico-mecánicas mínimas y así determinar con certeza las acciones que se van a realizar antes de construir el pavimento, con el fin de que el mismo no se vea afectado estructuralmente. Se deben tomar en cuenta las recomendaciones que se presentaron en las matrices del presente proyecto y evaluar que se cumpla con la condición esperada.
5. Para el control de las propiedades mecánicas de los materiales se recomienda que se realicen los ensayos correspondientes del material y de su fuente de extracción, ya que utilizar los parámetros establecidos en el CR-2010

puede ocasionar que se sobreestime la capacidad de los mismos y que el diseño no se comporte como se espera.

ser una realidad, principalmente en el régimen municipal, el cual carece más de recursos con respecto al gobierno central.

6. En el presente proyecto se utilizó el cemento como material estabilizador cuando se carezca de suficiente capacidad de soporte en la subrasante o en las capas granulares. Sin embargo, la cal puede ser un aditivo estabilizador más eficiente cuando se presenten problemas de arcillas expansivas, pero habría que valorar su costo, el cual es más elevado que el cemento. También se pueden tomar en cuenta otros estabilizadores como los materiales bituminosos, entre ellos la emulsión de rompimiento lento, entre otras.
7. Para el caso de los pavimentos, posterior al diseño de espesores por medio del método de la AASHTO 1993, se recomienda verificarlo mediante la utilización de criterios mecanísticos-empíricos, específicamente mediante un análisis de fatiga y deformación permanente (ahuellamiento), respetando los umbrales de falla y metodología establecida en la publicación especial: LM-PI-GM-INF-22-14, de LANAMME-UCR, esto con el fin de afinar más el diseño que se seleccionó. Para el caso del presente proyecto se realizó un análisis solo de fatiga para un diseño tipo en particular. No se consideró un análisis por deformación permanente.
8. Se recomienda implementar un control de la variable tránsito, mediante conteos anuales que permitan comparar durante el periodo de diseño del proyecto, el comportamiento del deterioro de la estructura, con el fin de tomar las medidas preventivas pertinentes, como la posibilidad de un recarpeteo para elevar la curva de deterioro.
9. Por último, se recomienda la implementación de estaciones de pesaje para controlar los factores camión y pesos admisibles, para que el deterioro de los pavimentos no se acelere. Sin embargo, esta medida está muy lejos de

Destacables

Por recomendación del profesor lector se incluye el siguiente apartado para incorporar aquellas curiosidades y situaciones especiales que se pudieron apreciar con los resultados obtenidos y que complementan las conclusiones expuestas:

1. Para el diseño de cunetas se pudo determinar que a partir del 10 % de pendiente longitudinal, la velocidad del flujo se vuelve erosiva, por lo tanto se requiere en esos casos de la colocación de elementos disipadores de energía, como aliviaderos, diques o si fuese posible cortar el caudal con algún paso de alcantarilla.
2. A mayor capacidad hidráulica del elemento seleccionado mayor será la longitud máxima permitida por velocidad erosiva del flujo, ya que, al utilizar un elemento más grande, el espejo de agua aumenta y por ende el área de contacto del flujo.
3. Para la determinación de alcantarillas a utilizar, se puede decir que las alcantarillas de cuadro son una solución más eficiente para causas en donde se generen grandes cantidades de arrastres de sedimentos y escombros, esto debido a su geometría con respecto a las alcantarillas circulares. Sin embargo, las alcantarillas de cuadro son más costosas que las circulares. Este dato se puede afirmar por experiencia personal en la práctica, ya que el presente proyecto no enfatizó en el análisis comparativo de costos para cada alternativa.
4. En el caso de los subdrenajes, para el control y abatimiento del nivel freático se puede utilizar como alternativa una cuneta onda, de una profundidad "h" mínima de 70 cm, en lugar de utilizar drenes o filtros, que representan una solución más cara y compleja.
5. Para el análisis y evaluación de las subrasantes, se puede concluir que entre más débil y más expansiva sea, se requerirá de una mayor cantidad de acciones u obras a realizar, con el fin de atenuar las consecuencias negativas que se puedan producir. En las matrices elaboradas se pueden obtener las recomendaciones necesarias para cada caso en particular.
6. Para el diseño estructural de pavimentos mediante el método de la AASHTO 1993, se obtienen de manera empírica una serie de espesores de capa para cada una de las estructuras de pavimentos seleccionadas, los cuales no necesariamente son una solución definitiva ya que se deben verificar mediante criterios mecanísticos-empíricos.
7. El control de la variable de tránsito es uno de los retos más grandes en la ingeniería vial en el régimen municipal, ya que no se controlan los diseños que se elaboran ni se evalúa su desempeño con respecto a datos reales, al no contar con conteos anuales, principalmente en épocas de mayor tránsito, ni tampoco se cuenta con estaciones de pesaje, por lo que la obtención de factores camión reales y conteos reales de vehículos es prácticamente inexistente.

Apéndices

Los apéndices que se presentan corresponden a las siguientes memorias de cálculo completas, para el ejemplo del diseño tipo utilizado:

1. Cálculo de ejes equivalentes de diseño.
2. Cálculo de CBR de diseño por unidad homogénea.
3. Memoria de cálculo de diseño del detalle tipo seleccionado, el cual corresponde a un pavimento flexible mediante el método de la AASHTO 1993.
4. Cálculo de la deformación horizontal “ ϵ_t ” en la base de la carpeta para el diseño realizado, mediante la teoría de “Boussinesq”, aplicando los principios de las leyes de fatiga.
5. Cálculo del análisis por fatiga según la metodología de la publicación LM-PI-GM-INF-22-14, de LANAMME-UCR, para el diseño realizado, y para los dos escenarios de tránsito: El teórico y el real.

APÉNDICE 1. CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO

TABLA 29. CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO TEÓRICOS						
	DISTRIBUCION VEHICULAR				Año 0	
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	592	137	273	111	65	124
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	45,5%	10,5%	21,0%	8,5%	5,0%	9,5%
% VEHÍCULOS PESADOS	14,5%					

TABLA 30. RESUMEN DATOS TEÓRICOS	
DATOS TEÓRICOS	AÑO 0
TPD	1300
Periodo de Diseño	10
Tasa de crecimiento "i"	3%
Factor Dirección	0,5
Factor Carril	1

$$N = N0 * FD * FC * 365 * \frac{(1 + i)^n - 1}{i}$$

N= 5080898 ESALS

TABLA 31. PROYECCIÓN TEÓRICA DE TRÁNSITO DURANTE EL PERIODO DE DISEÑO				
N° Año	Año	TPD	ESALS	ESALS Acumulados
T0	2017	1300		
T1	2018	1339	443209	443209
T2	2019	1379	456506	899715
T3	2020	1421	470201	1369916
T4	2021	1463	484307	1854223
T5	2022	1507	498836	2353059
T6	2023	1552	513801	2866860
T7	2024	1599	529215	3396075
T8	2025	1647	545092	3941166
T9	2026	1696	561444	4502611
T10	2027	1747	578288	5080898

Por lo tanto los ejes equivalentes de diseño para este proyecto serían de: **5,08E+06**

CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO REALES (CONTEOS)						
	DISTRIBUCION VEHICULAR				AÑO 1	
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	650	143	300	120	70	135
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	45,8%	10,1%	21,2%	8,5%	4,9%	9,5%
	DISTRIBUCION VEHICULAR				AÑO 2	
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	690	143	320	125	74	142
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	46,2%	9,6%	21,4%	8,4%	4,9%	9,5%
	DISTRIBUCION VEHICULAR				AÑO 3	
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	800	143	336	135	80	150
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	48,7%	8,7%	20,4%	8,2%	4,9%	9,1%
	DISTRIBUCION VEHICULAR				AÑO 4	

TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	840	143	355	145	85	160
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	48,6%	8,3%	20,5%	8,4%	4,9%	9,3%
DISTRIBUCION VEHICULAR						AÑO 5
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	880	143	375	152	90	168
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	48,7%	7,9%	20,7%	8,4%	5,0%	9,3%
DISTRIBUCION VEHICULAR						AÑO 6
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	925	143	395	165	96	180
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	48,6%	7,5%	20,7%	8,7%	5,0%	9,5%
DISTRIBUCION VEHICULAR						AÑO 7
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	971	150	415	173	101	190
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	48,6%	7,5%	20,7%	8,7%	5,0%	9,5%
DISTRIBUCION VEHICULAR						AÑO 8
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	980	150	435	185	105	200
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	47,7%	7,3%	21,2%	9,0%	5,1%	9,7%
DISTRIBUCION VEHICULAR						AÑO 9
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	1029	150	457	195	110	215
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	47,7%	7,0%	21,2%	9,0%	5,1%	10,0%
DISTRIBUCION VEHICULAR						AÑO 10
TIPO DE VEHÍCULO	AUTOS	BUSES C2	C2+	C2	C3	T3-S2
CANTIDAD DE VEHÍCULOS	1080	150	480	205	120	230
FACTOR CAMIÓN	0	1	3,44	3,74	4,4	4,72
% DISTRIBUCIÓN VEHICULAR	47,7%	6,6%	21,2%	9,0%	5,3%	10,2%

TABLA 32. DATOS REALES DE TRÁNSITO DURANTE EL PERIODO DE DISEÑO					
RESUMEN DATOS REALES	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
TPD (conteo)	1418	1493	1644	1728	1808
Tasa de crecimiento "i" real	9%	5%	10%	5%	5%
Factor Dirección	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Factor Carril	1	1	1	1	1
DATOS REALES	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
TPD (conteo)	1904	2000	2055	2157	2265
Tasa de crecimiento "i" real	5%	5%	3%	5%	5%
Factor Dirección	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Factor Carril	1	1	1	1	1

TABLA 33. COMPORTAMIENTO REAL DEL TRÁNSITO DURANTE EL PERIODO DE DISEÑO

N° Año	Año	TPD	ESALS	ESALS Acumulados
T0	2017	1300		
T1	2018	1418	469466	469466
T2	2019	1493	494266	963732
T3	2020	1644	544164	1507896
T4	2021	1728	571968	2079865
T5	2022	1808	598531	2678396
T6	2023	1904	630224	3308621
T7	2024	2000	662067	3970687
T8	2025	2055	680201	4650889
T9	2026	2157	713806	5364695
T10	2027	2265	749823	6114518

Por lo tanto los ejes equivalentes reales del periodo de diseño es:

6,11E+06

APÉNDICE 2. CÁLCULO DE CBR DE DISEÑO DE LA UNIDAD HOMOGÉNEA

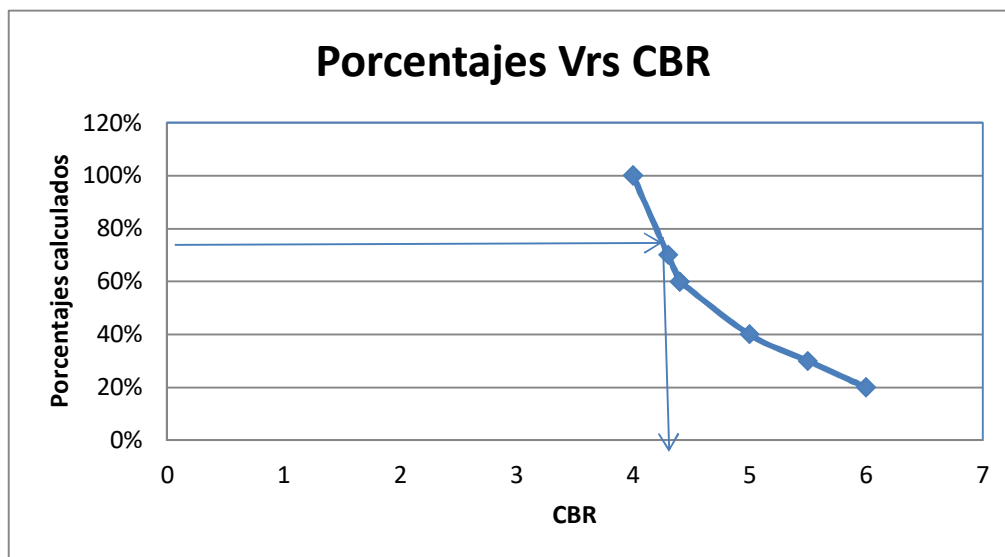
Valores obtenidos de CBR inalterado				
Apique	Abcisa	CBR inalterado	Número de valores iguales o mayores	% de valores iguales o mayores
5	4+500	4	10	100%
8	7+250	4	10	100%
10	9+500	4	10	100%
6	5+250	4,3	7	70%
2	1+500	4,4	6	60%
3	2+750	4,4	6	60%
7	6+500	5	4	40%
1	0+250	5,5	3	30%
4	3+250	6	2	20%
9	8+500	6	2	20%

Cuadro de obtención del percentil de diseño en función del número de Esals según INA

CLASE DE TRANSITO	Nivel de Transito (N)	Valor de diseño (%)
Liviano	10^4 o menos	60 %
Mediano	$10^4 - 10^5$	75 %
Pesado	Mayor a 10^5	87.5 %

En nuestro caso para un total de 5891295 de Esals se procede a utilizar un percentil 75%

Gráfico de CBRs VRS percentiles calculados



Conclusión: Según el gráfico se obtiene un CBR de diseño aproximadamente de 4,3%

APÉNDICE 3. DISEÑO DE ESPESORES PARA PAVIMENTOS FLEXIBLE CON CARPETA ASFÁLTICA SEGÚN AASTHO 1993

ECUACIÓN DE LA GUÍA AASTHO 1993

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta PSI}{0.40 + \frac{4.2 - 1.5}{1094 (SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log M_R - 8.07$$

MÓDULO DE RESILENCIA DE LA SUBRASANTE

Obtención del módulo de resiliencia de la subrasante según la siguiente ecuación para valores de CBR < 10% y válido para suelos finos

$$Mr = 1500 * CBR (\%)$$

Mr en PSI

$$Mr = 100 * CBR (\%)$$

Mr en Kg/cm²

CBR de diseño según INA:

4,00%

**Módulo de resiliencia de subrasante
(PSI):**

6000

NIVEL DE CONFIANZA

VALORES RECOMENDADOS PARA CONFIANZA y So

CLASIFICACIÓN	URBANO (%)	RURAL(%)
Autopista	85 - 99	80 - 99
Arterias Principales	80 - 99	75 - 99
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

FUENTE: GUIA AASHTO 93

So pavimentos flexibles: 0.40 to 0.50
So pavimentos rígidos: 0.35 to 0.40

CONFIBILIDAD %	DESVIACIÓN NORMAL ESTÁNDAR ZR	CONFIABILIDAD %	DESVIACIÓN NORMAL ESTÁNDAR ZR
50	0.000	92	1.405
60	0.253	93	1.476
70	0.524	94	1.555
75	0.674	95	1.645
80	0.841	96	1.763
85	1.037	97	1.881
90	1.283	98	2.054
91	1.340	99	2.327
		99.9	3.090

FUENTE: GUIA AASHTO 93

Desviación estándar normal para vía colectora rural (ZR):

1,037

Utilizar un 85% de confianza

Desviación estandar debido a proyecciones de tránsito y desempeño del pavimento (So):

0,49

Asumir con errores en la estimación del tránsito

So= 0.44 →

Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en la estimación del transito

So= 0.49 →

Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en estimación del transito. Nc=50%

SERVICIABILIDAD

Índice de serviciabilidad inicial:

Po= 4.5 para pavimentos rígidos

Po= 4.2 para pavimentos flexibles

Utilizar Po=

4

Indice de serviciabilidad final:

Pt= 2.5 o más para caminos muy importantes

Pt= 2.0 para caminos de tránsito menor

Utilizar Pt= 2

$\Delta \text{PSI} = 2$

COEFICIENTES ESTRUCTURALES

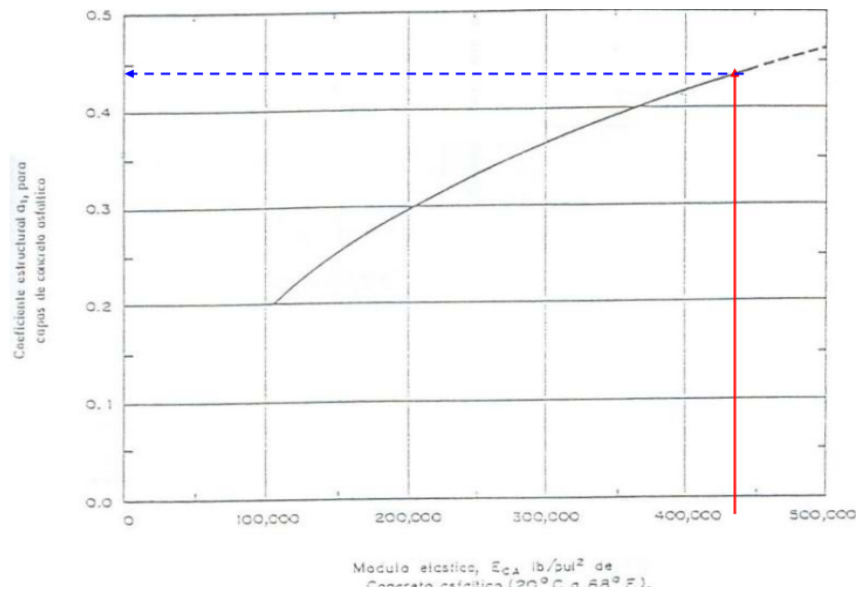
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

Para mezcla asfáltica en caliente y asumiendo un valor del módulo dinámico de aproximadamente 400000 PSI

- Concreto asfáltico

a_1
 E_{ac} < 0.20
100,000 psi

0.44
450,000 psi



Utilizar $a_1 = 0,42$

BASE GRANULAR

Para base granular se asume lograr un CBR mínimo de 80% según CR-2010



Utilizar a2 = 0,13

- Base granular

$$a_2 = 0.249 * (Lg Mr_{base}) - 0.977$$

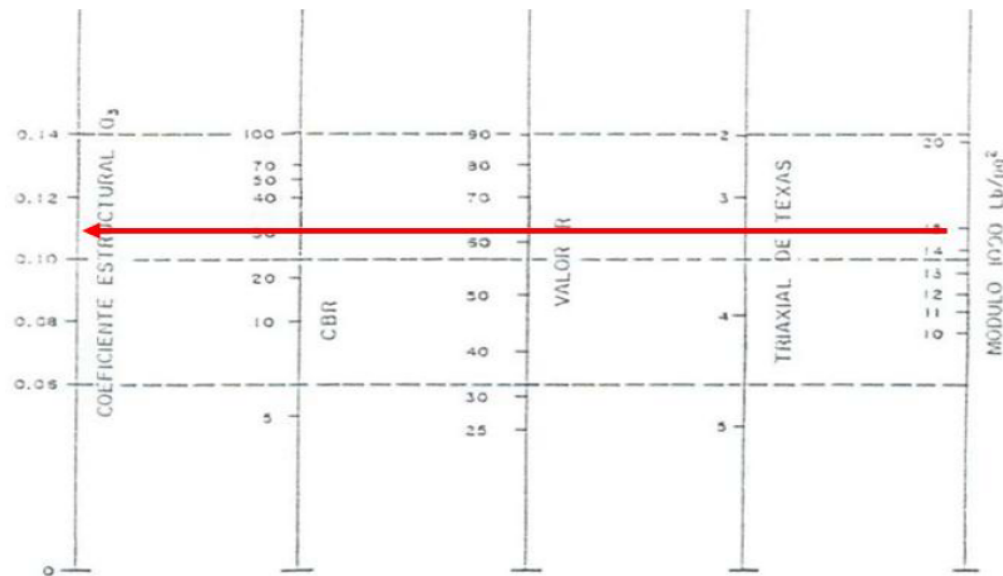
a2
Ebg

0.06
14,000 psi

0.14
30,000 psi

SUBBASE GRANULAR

Para subbase granular se asume lograr un CBR mínimo de 30% según CR-2010



Utilizar $a_3 = 0,11$

- Subbase granular $a_3: 0.227 * (\text{Log } M_{r \text{ subbase}}) - 0.839$

a_3
Esb

0.06
8,000 psi

0.14
22,000 psi

COEFICIENTES DE DRENAJE

Para el caso de las premisas establecidas originalmente y siendo conservador, se considerará un 25% o más del tiempo que la estructura estará próxima a la saturación, y una calidad de drenaje buena

Valores del Coeficiente de drenaje

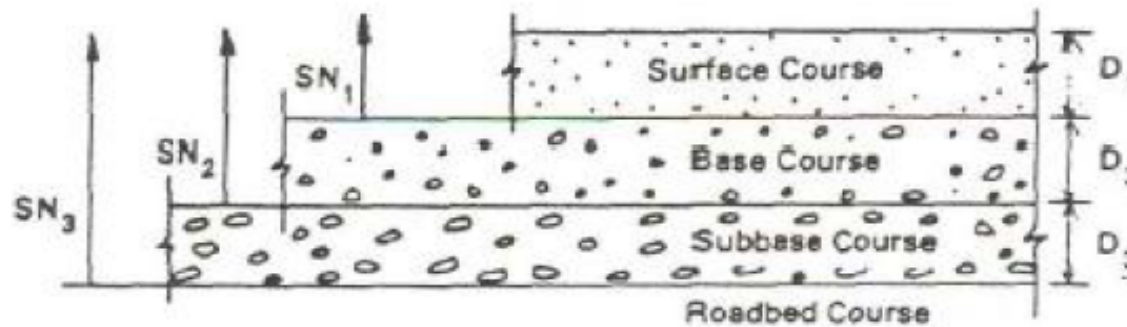
Período de evacuación de agua	Calidad del Drenaje	% de tiempo en que la estructura está próxima a la saturación			
		< 1%	1 % - 5%	5% - 25%	> 25%
2 horas	Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
1 día	Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
1 semana	Aceptable	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
1 mes	Pobre	1.15 - 1.05	1.08 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
No drenará	Muy Pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

m2=m3= 1

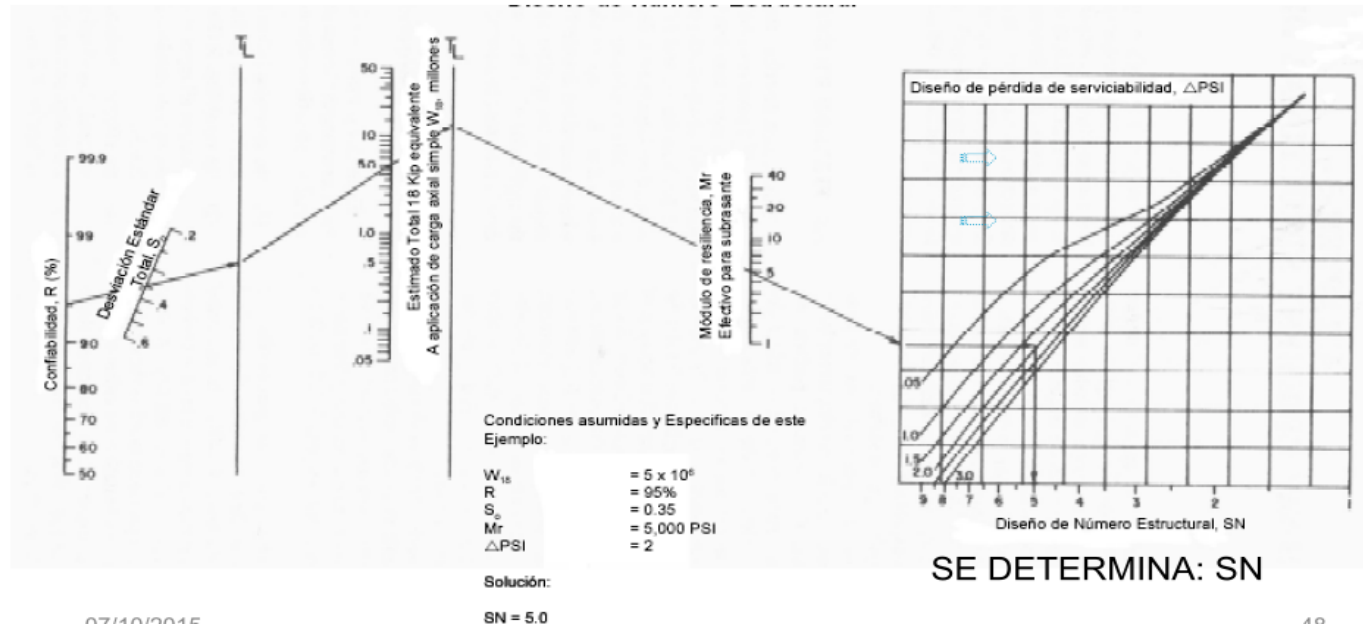
Utilizar m2=m3=

1

NÚMERO ESTRUCTURAL SN



MONOGRAMA PARA CÁLCULO DE NÚMERO ESTRUCTURAL SN



CON LA AYUDA DEL PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LOS NÚMEROS ESTRUCTURALES SE OBTIENE:

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento: ☒ Pavimento flexible ☐ Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (S_o): $85\% \text{ } Z_r = -1.037$ $S_o = 0.49$

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial PSI final

Módulo resiliente de la subrasante: Mr psi

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)

Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis: ☒ Calcular SN ☐ Calcular W_{18}

$W_{18} =$

Número Estructural: SN =

SN = 4,53

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento
☒ Pavimento flexible ☐ Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)
 85 % $Z_r = -1.037$ So 0.49

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial 4 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante
 Mr 15000 psi

Información adicional para pavimentos rígidos
 Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi)
 Coeficiente de transmisión de carga - (J)
 Módulo de rotura del concreto - S_c (psi)
 Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis
☒ Calcular SN **W18 =** 5000000 ☐ Calcular W18

Número Estructural
SN = 3.30

Calcular Salir

SN2 = 3,3

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento
☒ Pavimento flexible ☐ Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)
 85 % $Z_r = -1.037$ So 0.49

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial 4 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante
 Mr 28000 psi

Información adicional para pavimentos rígidos
 Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi)
 Coeficiente de transmisión de carga - (J)
 Módulo de rotura del concreto - S_c (psi)
 Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis
☒ Calcular SN **W18 =** 5000000 ☐ Calcular W18

Número Estructural
SN = 2.63

Calcular Salir

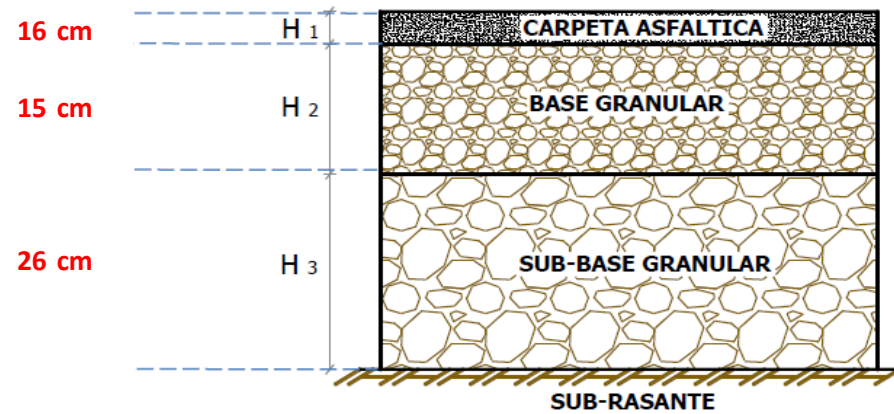
SN1 = 2,63

CÁLCULO DE ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

$$S_N = a_1 * H_1 + a_2 * H_2 * m_2 + a_3 * H_3 * m_3$$

$SN1 = a1 * d1$			$2,63 = 0,42 * d1$	$d1 = 6,26 \text{ in}$ $d1 = 15,91 \text{ cm}$
Redondear espesor de carpeta	16 6,30	cm in		SN1 recalculado 2,65
$SN2 - SN1 = a2 * d2 * m2$			$3,3 - 2,65 = 0,13 * 1 * d2$	$d2 = 5,03 \text{ in}$ $d2 = 12,78 \text{ cm}$
Redondear espesor de base a 15 cm	15 5,91	cm in		SN2 recalculado 3,41
$SN3 = a1 * d1 + a2 * d2 * m2 + a3 * d3 * m3$				$d3 = 10,15 \text{ in}$ $d3 = 25,78 \text{ cm}$ $4,52 < 6,0 \text{ AASTHO}$
Redondear espesor de subbase	26 10,24	cm in		SN3 recalculado 4,54

RESUMEN DE ESPESORES DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO



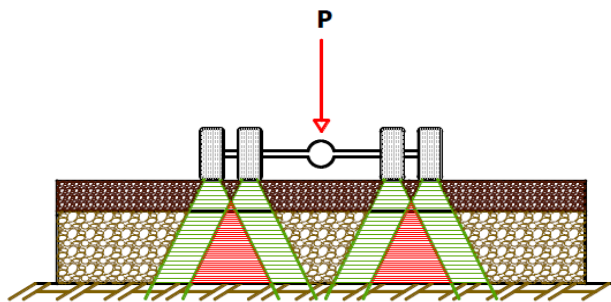
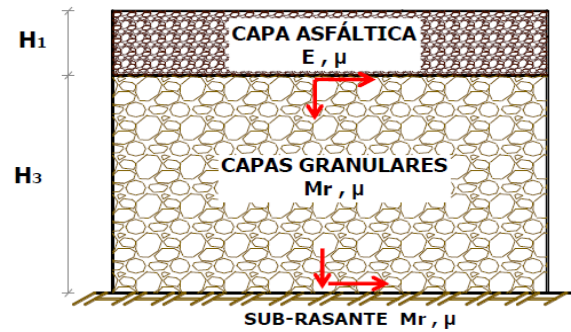
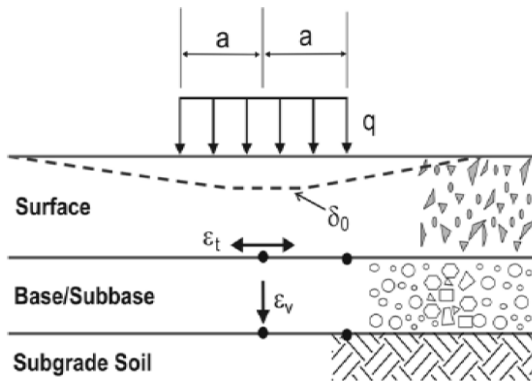
ESPESORES MÍNIMOS SUGERIDOS SEGÚN AASTHO

Número de ESAL's	Capas Asfálticas	Base Granular
Menos de 50,000	3.0 cm	10 cm
50,000 - 150,000	5.0 cm	10 cm
150,000 - 500,000	6.5 cm	10 cm
500,000 – 2,000,000	7.5 cm	15 cm
2,000,000 – 7,000,000	9.0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10.0 cm	15 cm

Fuente: Guía para diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993.

APÉNDICE 4. CÁLCULO DE DEFORMACIÓN HORIZONTAL "εt" EN LA BASE DE LA CARPETA

RESPUESTA DEL PAVIMENTO



SEMI EJE

P (eje) = 18000 libras
P (rueda doble) = 9000 libras
H1 Carpeta = 6,30 pulgadas

Radio de área de contacto de la llanta = 4,52 pulgadas

Área de contacto 2 llantas 128,302912 Pul²

Presión de inflado 70 PSI

Módulo dinámico carpeta 450000 PSI

Módulo poisson carpeta 0,3

Deformación "εt" 3,51078E-05

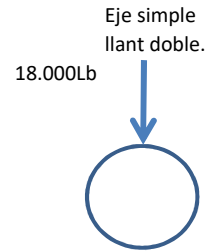
$$\xi_r = \frac{(1+\nu) Q}{2 E} \left[1 - 2 \nu - \frac{2 (1-\nu) z}{(a^2 + z^2)^{1/2}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right]$$

Teoría de Boussinesq

APÉNDICE 5. REVISIÓN DE DISEÑO POR FATIGA

C.A.
BG
SBG

E (KSI)	μ	H(IN)
450	0,35	6,30
28	0,4	5,9
15	0,4	10,2
4,65	0,45	



Ejes equivalentes: 5.080.898,32

Presión de inflado: 100 PSI

PREDECIR EL AGRIETAMIENTO POR FATIGA VS. TIEMPO.

DESARROLLO

I. Et a partir de leyes de fatiga

Et: 3,51E-05

II. Cálculo del Nf. Modelo de predicción hacia el exterior

MR: $K1 \cdot \Theta^{K2}$

Hac 6,30 in

Vb= 10,8 Va= 4

E: 450000

Nf: $0.00432 \cdot K1 \cdot C \cdot (1/Et)^{3.9492} \cdot (1/E)^{1.281}$

Repeticiones para agrietamiento por fatiga.

K1: $1/(0.000398 + (0.003602/(1 + e^{(11.02 - 3.49 \cdot h_{ac})})))$

MODELO GENÉRICO DE PREDICCIÓN DE AGRIETAMIENTO HACIA EL EXTERIOR

$$k'_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 \cdot h_{ac})}}}$$

K1: 250,0038968

C: 10^M Si no se conoce la dosificación de la mezcla, C= 1

M= $4.84 \cdot (Vb/(Va + Vb) - 0.69)$

M= 0,192291892

C= 1,557011757

Nf: $0.00432 \cdot K1 \cdot C \cdot (1/Et)^{3.9492} \cdot (1/E)^{1.281}$

Agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba

Nf: 24.196.671.724,18

III. Cálculo del daño di y gráfico di vs. Tiempo

Agrietamiento por fatiga (%): Fisuras de abajo hacia arriba: % del area de la huella

$$FC = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 \cdot C'_1 + C_2 \cdot C'_2 \cdot \log_{10}(D \cdot 100))}} \right) \cdot \left(\frac{1}{60} \right)$$

C1= 1,00 C'1= - 2,00

C2= 1,00 C'2= -2,54482147

FC= Ver cuadro

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i}$$

D = daño.

T = Número total de períodos.

n_i = Tránsito actual para el período i.

N_i = Tránsito permitido para el período i.

Ejes equivalentes período de diseño	Porcentaje de área agrietada antes de la falla
< 3 millones	75 %
3 - 15 millones	50 %
> 15 millones	20 %

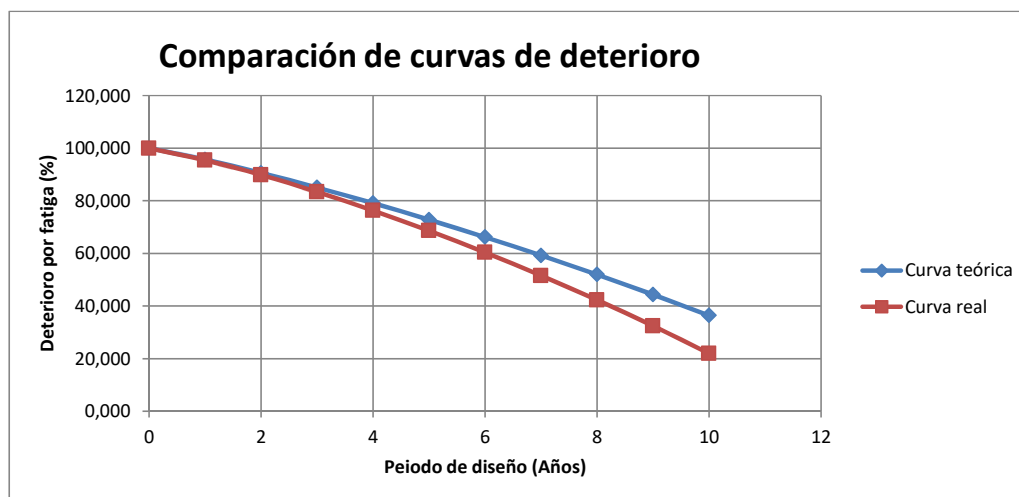
TABLA 34. DATOS DE CURVA DE DETERIORO TEÓRICO

Año	N	DETERIORO POR FATIGA di	SUMAT di	DETERIORO POR FATIGA DE MENOS A MÁS	AGRIETAMIENTO DE FATIGA ABAJO A ARRIBA
0				100,000	0
1	443209	0,0000183	0,0000183	95,704	4,296
2	456506	0,0000189	0,0000372	90,605	9,395
3	470201	0,0000194	0,0000566	85,049	14,951
4	484307	0,0000200	0,0000766	79,110	20,890
5	498836	0,0000206	0,0000972	72,819	27,181
6	513801	0,0000212	0,0001185	66,191	33,809
7	529215	0,0000219	0,0001404	59,233	40,767
8	545092	0,0000225	0,0001629	51,946	48,054
9	561444	0,0000232	0,0001861	44,330	55,670
10	578288	0,0000239	0,0002100	36,381	63,619
Total Esal's	5080898	0,0002100			

TABLA 35. DATOS DE CURVA DE DETERIORO REAL

Año	N	DETERIORO POR FATIGA di	SUMAT di	DETERIORO POR FATIGA DE MENOS A MÁS	AGRIETAMIENTO DE FATIGA ABAJO A ARRIBA
0				100,000	0
1	469466	0,0000194	0,0000194	95,422	4,578
2	494266	0,0000204	0,0000398	89,864	10,136
3	544164	0,0000225	0,0000623	83,377	16,623
4	571968	0,0000236	0,0000860	76,284	23,716
5	598531	0,0000247	0,0001107	68,638	31,362
6	630224	0,0000260	0,0001367	60,391	39,609
7	662067	0,0000274	0,0001641	51,548	48,452
8	680201	0,0000281	0,0001922	42,301	57,699
9	713806	0,0000295	0,0002217	32,445	67,555
10	749823	0,0000310	0,0002527	21,944	78,056
Total Esal's	6114518	0,0002527			

Comparación de curvas de deterioro



Anexos

Los anexos presentados corresponden a los siguientes:

1. Factores camión, según MOPT-CONAVI.
2. Nomogramas y gráficos para el diseño de pavimentos rígidos mediante AASHTO 1993.
3. Portada publicación: LM-PI-GM-INF-22-14, de gestión municipal de LANAMME-UCR.

ANEXO 1. FACTORES CAMIÓN UTILIZADOS POR MOPT-CONAVI

Tipo de vehículo	Costa Rica MOPT-CONAVI	Lanamme 2007 Rango FC	Control de pesos 2009 Rango FC
Carga liviana (C2+)	0.39	0.01-0.23	-
2 Ejes (C2)	1.00	0.45-1.16	0.23-0.52
3 Ejes (C3)	1.45	1.97-3.77	0.65-1.33
4 Ejes (C4)	-	-	0.12-1.87
3 Ejes (T2-S1)	-	-	0.19-2.85
4 Ejes (T3-S1)	-	-	0.29-2.33
5 Ejes (T3-S2)	2.70	2.10-4.23	0.74-2.06
T3-S3	-	-	0.47-2.49

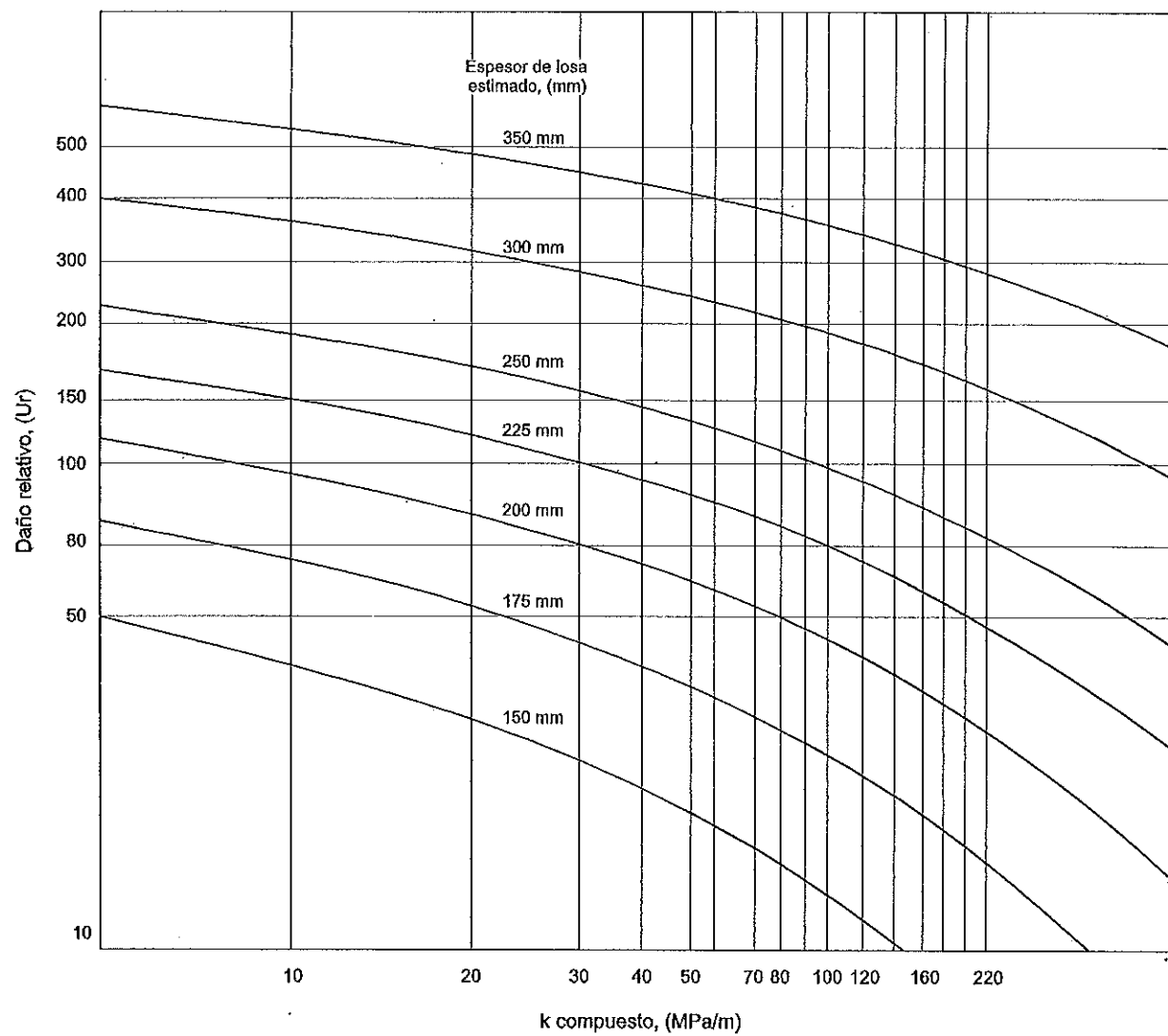


Figura 10. Nomograma para determinar el deterioro relativo, U_r .

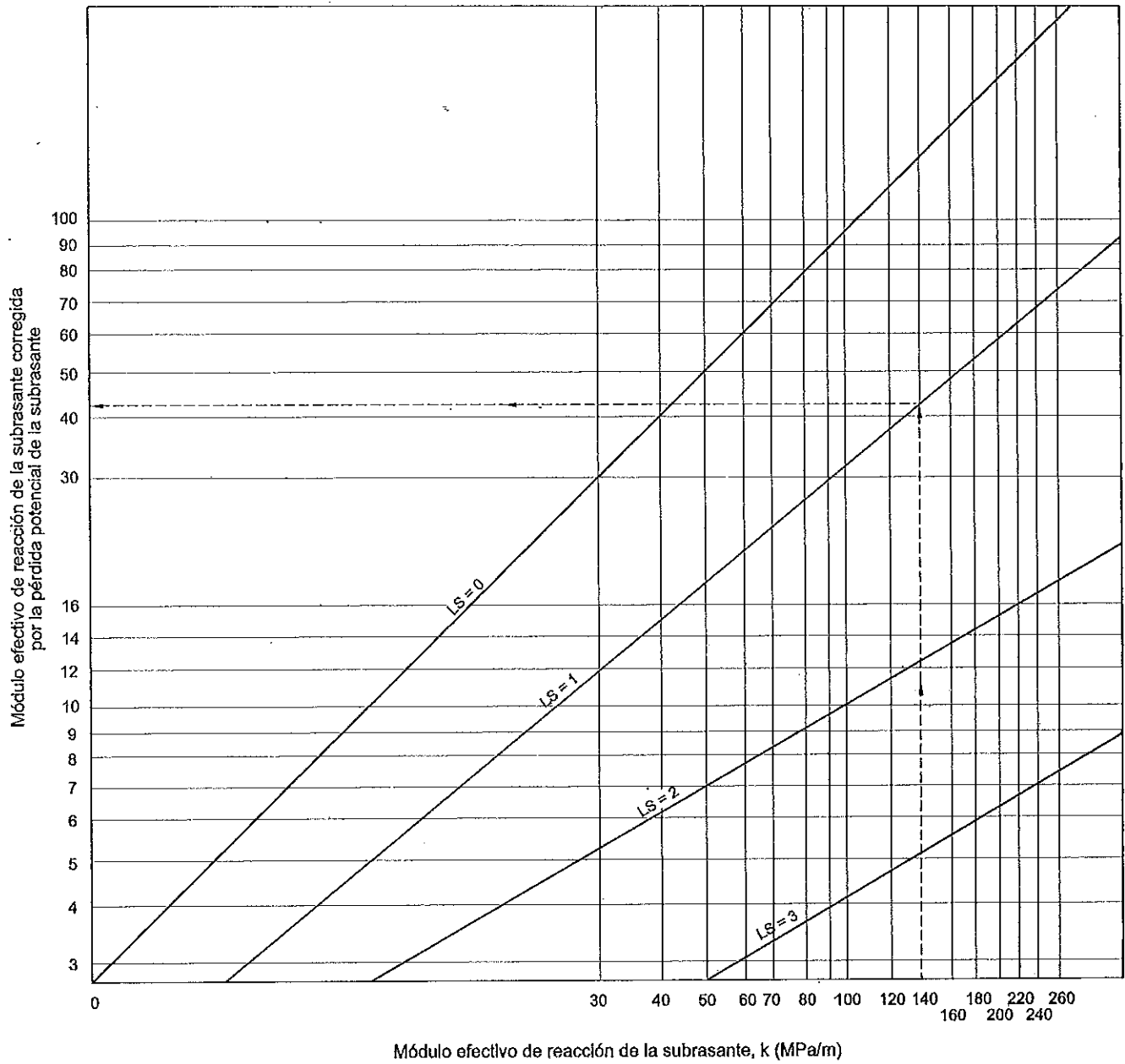


Figura 11. Nomograma para corregir el módulo de reacción efectivo por pérdida potencial de soporte de la subbase.

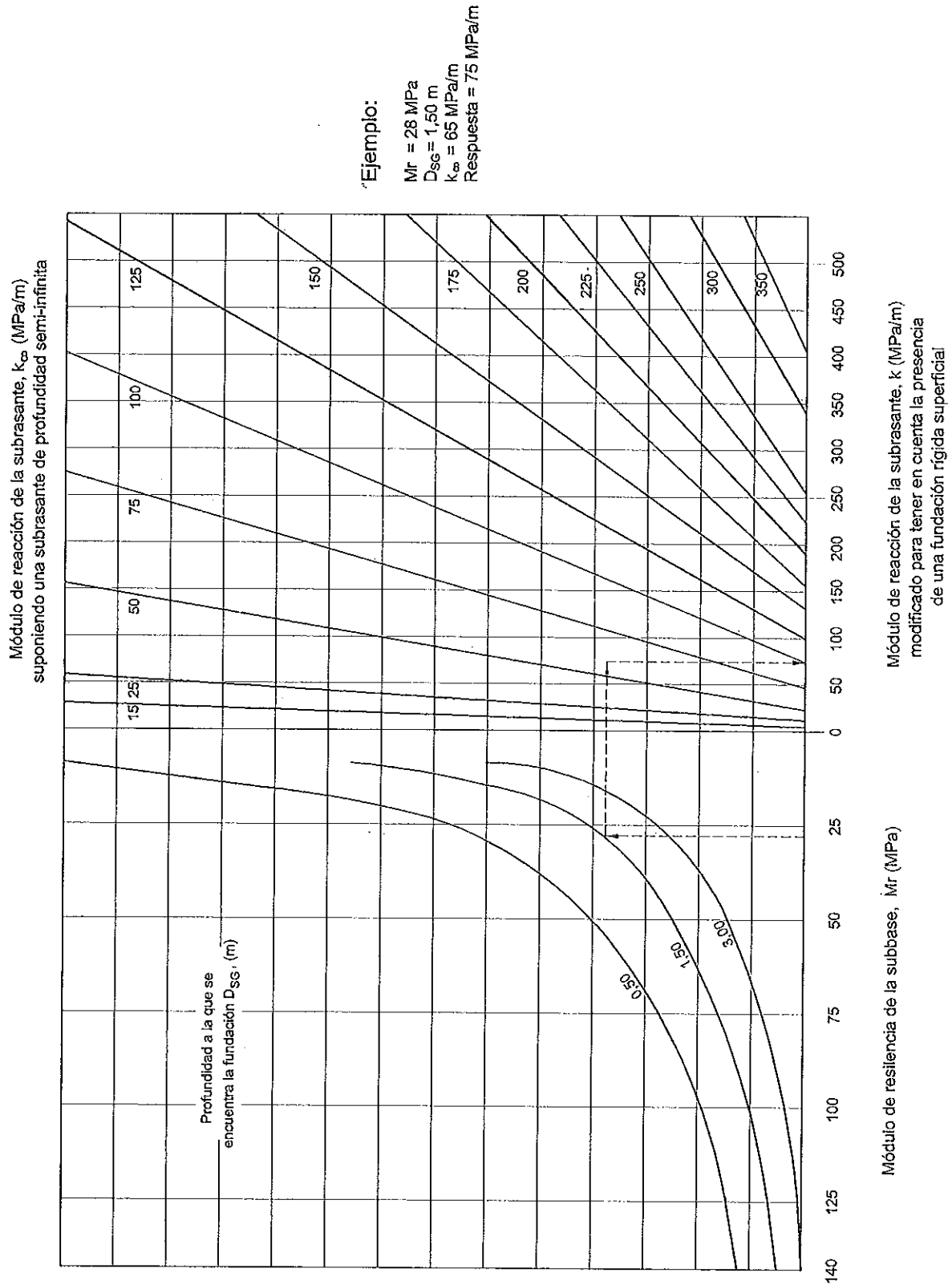
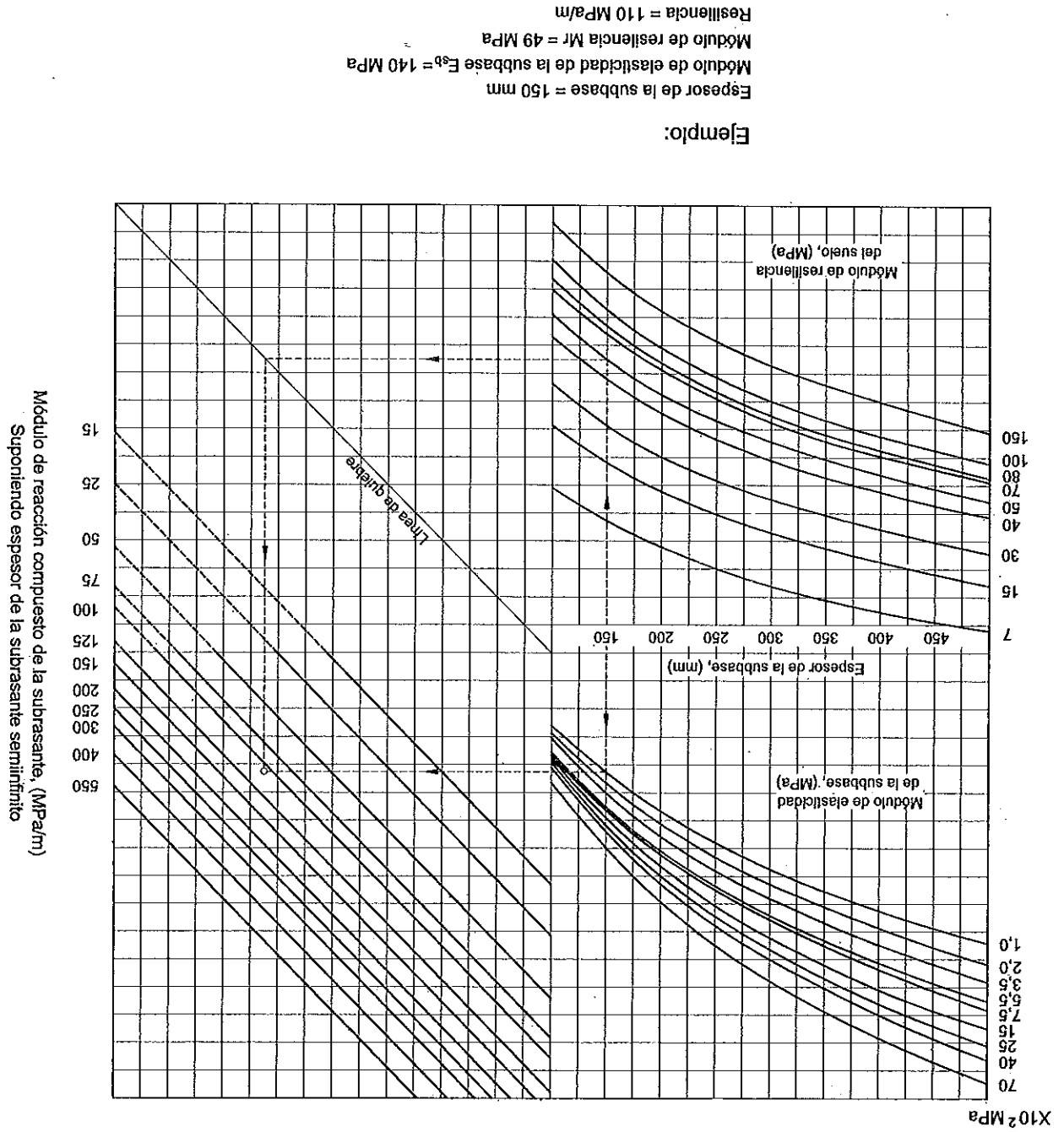


Figura 9. Nomograma para corregir el valor de k por la presencia de una capa rígida (estrato de roca) a menos de 3 m de profundidad.

Figura 8. Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita.



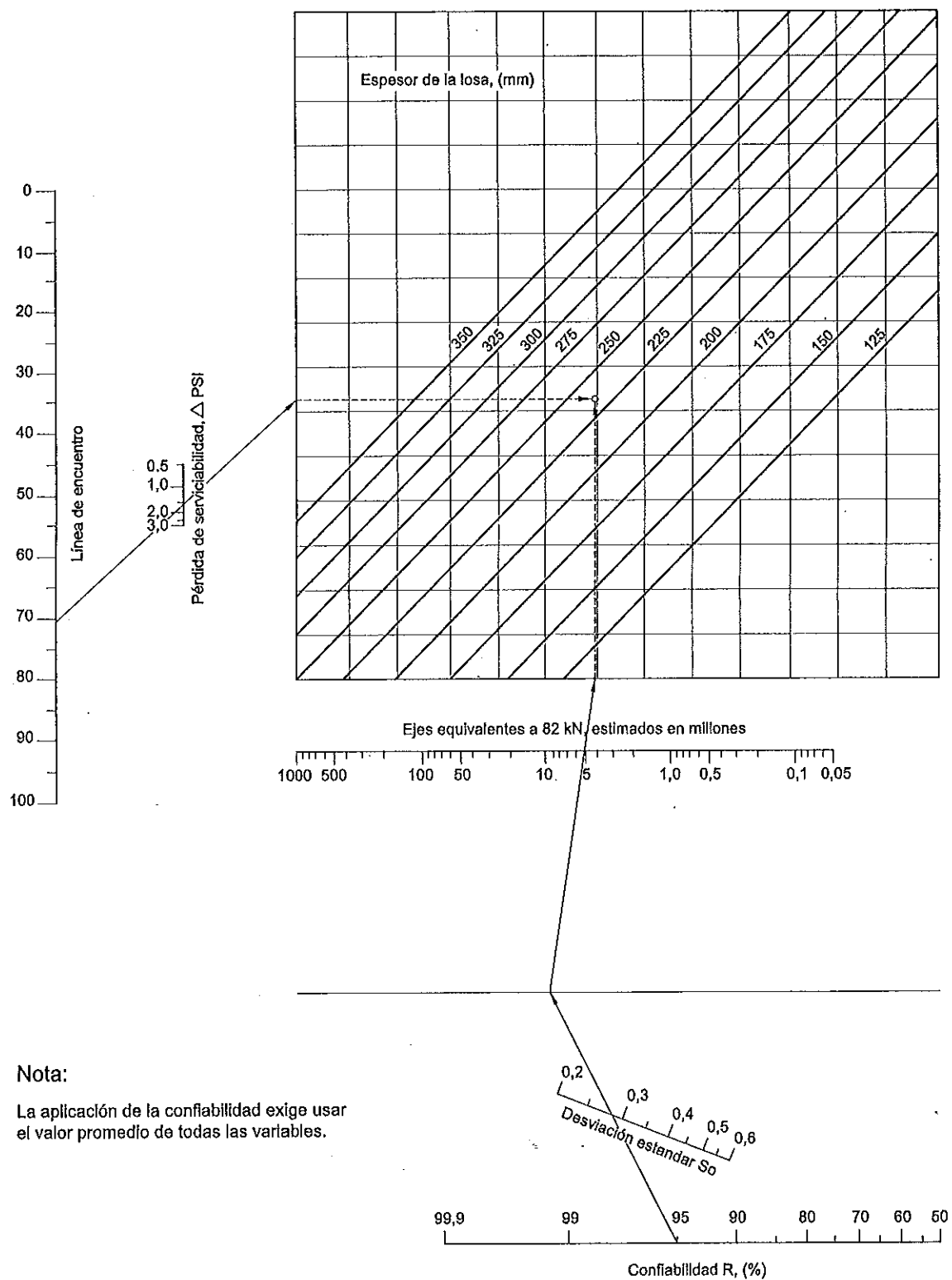
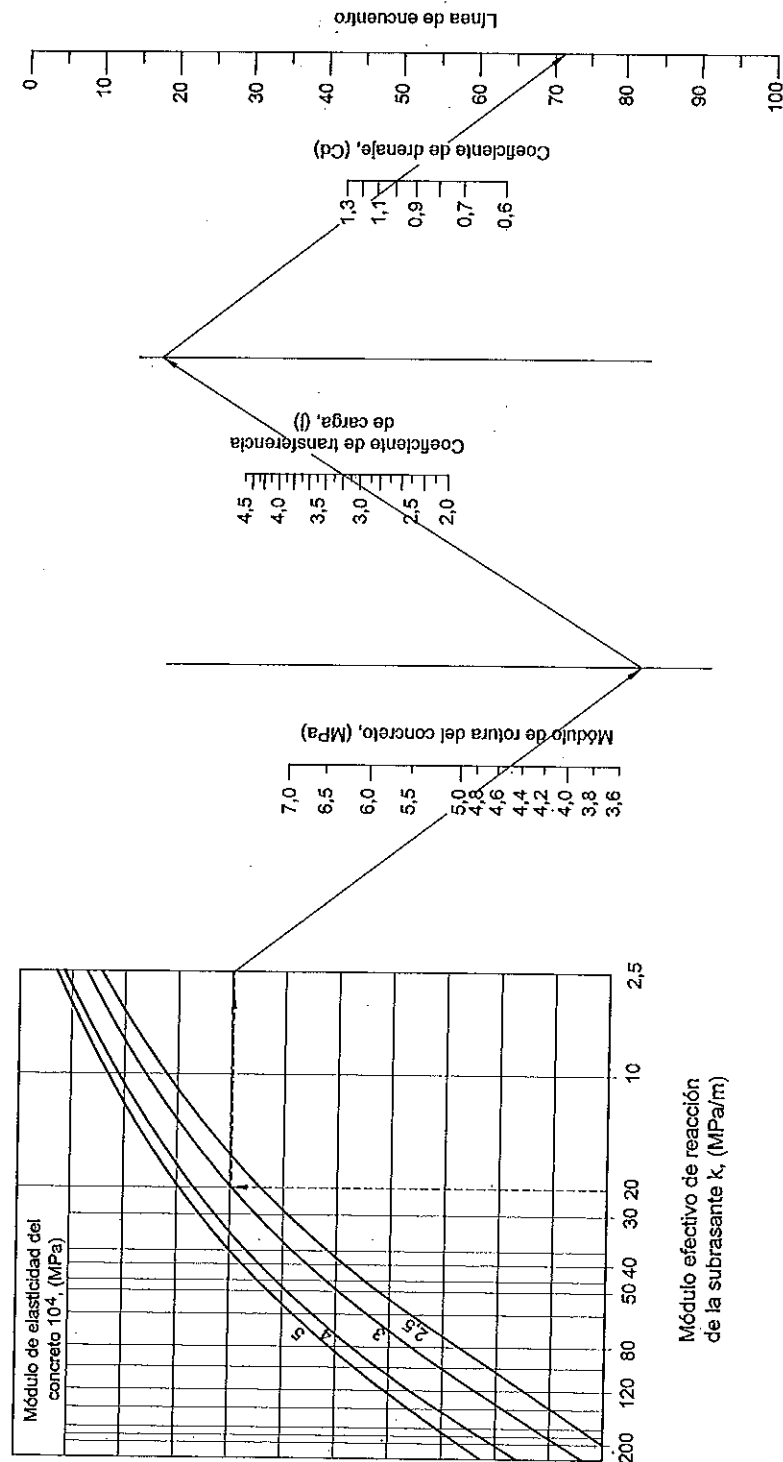


Figura 7. Nomograma AASHTO (segunda parte).



Ejemplo:

$k = 20$ MPa/m
 $E_c = 35000$ MPa
 $M_r = 4,5$ MPa
 $j = 3,2$
 $C_d = 1$

$S_o = 0,29$
 $R = 95\%$ ($Z_r = 1,645$)
 $\Delta PSI = 4,2-2,5 = 1,7$
 $w_{82} = 5,1 \times 10^6$
 Solución $D = 250$ mm

Figura 7. Nomograma AASHTO (primera parte).

PUBLICACIÓN ESPECIAL

PROYECTO: LM-PI-GM-INF-22-14

RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES CON LA INCORPORACIÓN DE
CRITERIOS MECÁNICO-EMPÍRICOS

PROGRAMA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE



Referencias

- Chow.V.1994” Hidráulica de canales abiertos”. Estados Unidos. Mc Graw Hill, 6p.
- French. R.1988” Hidráulica de canales abiertos”. Estados Unidos. Mc Graw Hill, 374,378p.
- Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volúmenes de tránsito. República de Colombia, Instituto Nacional de Vías, 1997.
- Manual de consideraciones técnicas, hidrológicas e hidráulicas para la infraestructura vial en Centroamérica. SIECA, 2016.
- Hidráulica de Canales. Máximo Villón Béjar, Editorial tecnológica de Costa Rica, 2008.
- Keller, Gordon; Sherar, James. 2004. Ingeniería de caminos rurales. México: Instituto Mexicano de Transporte.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte, MOPT. 2010. MANUAL DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, CAMINOS Y PUENTES, CR-2010.
- Módulo IV. Técnico en diseño de pavimentos. Diseño Racional de Pavimentos Flexibles y Rígidos. Ing. Fredy Alberto Reyes Lizcano.2012
- "Arcillas expansivas: su estudio y patología". Artículo de Emilio Yanes Bustamante. Está incluido dentro de la publicación "Actas del Congreso sobre Patología y Control de Calidad en la Construcción", Sevilla (1992), publicado por la Secretaría General Técnica de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de Andalucía
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA. 2002. MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS.
- AASHTO, “Guide for design of pavement structures”, Washington D.C, 1993.
- Pavimentos materiales, construcción y diseño. Hugo Alexander Rondón Quintana y Freddy Alberto Reyes Lizcano, edición 2015.
- Diario Oficial de Costa Rica La Gaceta No. 13, miércoles 19 de enero del 2005.
- Consejo Nacional de Vialidad, CONAVI, Dirección de Ingeniería.
- Unidad de gestión municipal, LANAMME. 2014. Recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimentos flexibles con la incorporación de criterios mecánico-empíricos.